UNIVERSITE DE TOULOUSE

N° d'ordre
77

Année 1947

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Abdul Azim ZIAÏ
Ingénieur I. E. T.
Docteur ès-sciences

1re Thèse. - **Sur la mesure des pertes à vide dans les Transformateurs.**

2me Thèse. - **Propositions données par la Faculté.**

Soutenues le 26 juillet 1947 devant la Commission d'examen

MM. ESCANDE *Président*
TESSIE-SOLIER } *Examinateurs*
DUPIN }

TOULOUSE
IMPRIMERIE TOULOUSAINE
(R. LION)
2, RUE ROMIGUIÈRES, 2

1947

Sur la mesure des pertes à vide dans les Transformateurs

UNIVERSITE DE TOULOUSE

FACULTÉ DES SCIENCES

PERSONNEL

Administration :

MM.	DUPOUY	Doyen.
	MIGNONAC	Assesseur.

Honorariat :

MM.	DELTHEIL	Recteur honoraire, Doyen honoraire.
	DOP	Doyen honoraire, Professeur honoraire.
	JACOB	Professeur honoraire.
	DRACH	Professeur honoraire.
	BOUASSE	Professeur honoraire.
	SOURISSEAU	Professeur honoraire.
	CLARENS	Professeur honoraire.
	CAMICHEL	Professeur honoraire, membre de l'Institut.
	MENGAUD	Professeur honoraire.
	BUHL	Professeur honoraire.
	DUFFOUR	Professeur honoraire.

Professeurs :

MM.	ROY	Mécanique ration. et appl. Corresp. de l'Institut.
	DELTHEIL	Calcul différentiel et intégral.
	VANDEL	Zoologie.
	CATHALA	Chimie physique et électrochimie.
	MIGNONAC	Chimie générale.
	DESPAX	Zoologie appliquée et hydrobiologie.
	ESCANDE	Mécanique des fluides.
	JACQUES	Mathématiques générales.
	DUPOUY	Physique.
	PICHOT	Physique.
	GAUSSEN	Botanique.
	CASTÉRAS	Géologie.
	BEDOS	Chimie.
	CHALAUD	Botanique agricole.
	CAPDECOMME	Minéralogie.

Professeurs sans chaire :

NOUVEL	Zoologie.
DUPIN	Electrotechnique.
TEISSIE-SOLIER	Electrotechnique.
GALLAIS	Chimie.

Maîtres de conférences :

MORQUER	Botanique.
RIVALS	Agriculture.

Chargé de cours

PALOQUE	Astronomie.

Chargé de conférences

DURAND	Astronomie.

Secrétariat :

M. DUCROS	Secrétaire

UNIVERSITE DE TOULOUSE

N° d'ordre
77

Année 1947

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Abdul Azim ZIAÏ
Ingénieur I. E. T.
Docteur ès-sciences

1ᵉ Thèse. - **Sur la mesure des pertes à vide dans les Transformateurs.**

2ᵐᵉ Thèse. - **Propositions données par la Faculté.**

Soutenues le 26 juillet 1947 devant la Commission d'examen

MM. ESCANDE — *Président*
TESSIE-SOLIER, DUPIN — *Examinateurs*

TOULOUSE
IMPRIMERIE TOULOUSAINE
(R. LION)
2, RUE ROMIGUIÈRES, 2

1947

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

A SA MAJESTE MOHAMED ZAHER SHAH

Roi d'Afghanistan.

Hommage de fidélité.

A LA MEMOIRE DE MON PERE

A SON ALTESSE ROYALE

LE MARECHAL SHAH WALI KHAN

Commandeur de la Légion d'honneur,
Ministre Plénipotentiaire de Sa Majesté le Roi d'Afghanistan à Paris.

Hommage respectueux.

A MON MAITRE MONSIEUR TEISSIE-SOLIER

Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse,
Professeur à l'Institut Electrotechnique de Toulouse.

Hommage de ma profonde reconnaissance.

A TOUS MES MAITRES

Avant-Propos

Je tiens à exprimer ma grande reconnaissance à la France qui m'a si généreusement accueilli et dont le rayonnement intellectuel s'exerce jusque dans mon lointain pays; puisque c'est à elle la première que nous fîmes appel, lorsque nous eumes besoin de fonder des Ecoles puis des Universités.

Pendant huit ans, dans ses Facultés, j'ai bénéficié d'un enseignement éclairé et fructueux avec des Professeurs distingués qui m'ont guidé inlassablement et qui m'ont fait aimer leur pays.

Puissent-ils trouver ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie particulièrement mes maîtres de l'Institut Electrotechnique de Toulouse, M. Escande, Directeur de l'Institut qui a bien voulu mettre ses Laboratoires à ma disposition et qui m'a encouragé dans mes recherches.

M. Teissié-Solier dont les conseils précieux et la sollicitude constante m'ont permis de mener à bien mon travail.

M. Dupin dont j'ai suivi avec un vif intérêt tous les cours et qui m'a toujours témoigné la plus grande bienveillance.

Introduction

En février 1944, le Bureau de Contrôle de l'Institut Electrotechnique de Toulouse a effectué une série d'essais sur un transformateur 60.000 volts-5.000 volts de l'usine de Saint-Juéry (Saut-du-Tarn).

L'appareil essayé était un transformateur triphasé à refroidissement naturel, n° 1.504.876, construit dans les usines Alsthom.

Puissance : 5.000 kilovolts-ampères.

Cos Φ : 0,8.

Fréquence : 50 Hz.

Secondaire : Tension entre phases 60.000 volts + 5 % couplé en étoile.

Primaire : Tension à vide entre phase : 5.325 volts couplé en étoile.

1° Le transformateur étant à vide, on a alimenté le primaire par un alternateur de l'Usine de Saint-Juéry. On a déterminé les pertes à vide en fonction de la tension. On faisait varier cette dernière en agissant sur le rhéostat d'excitation de l'alternateur. La fréquence était maintenue constante par le régulateur de la turbine.

U étant la tension entre phases du primaire en Volts.

I le courant par phase au primaire en ampères.

P les pertes à vide du transformateur en kilowatts.

Cos Φ : Le facteur de puissance.

Des transformateurs d'intensité et des transformateurs de potentiel, alimentaient les appareils de mesure.

On a obtenu dans ces conditions les résultats donnés dans le tableau 1.

TABLEAU N° 1

NUMÉRO de la MESURE	I AMPÈRES	U VOLS	P KILOWATTS	F P.P.S.	COS Φ
1	5,8	4750	9,22	50,75	0,19
2	6,22	4780	9,9	50,5	0,19
3	6,14	4750	9,66	50,5	0,19
4	8,55	4780	11,2	49,5	0,15
5	17,8	5560	17	50	0,10
6	17,79	5570	17	50	0,10

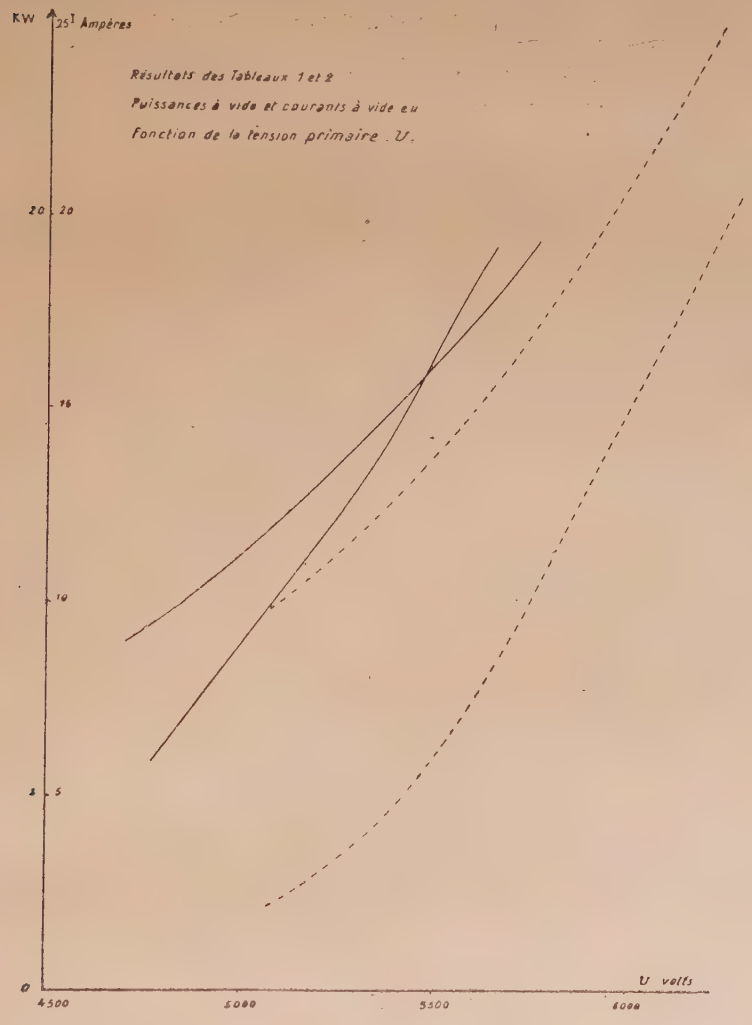
2° La ligne de 60,000 volts de Lentin à Saint-Juéry étant reliée au secondaire du transformateur, on a effectué une seconde série de mesures sur l'ensemble du transformateur et de la ligne à vide. En faisant varier la tension et en maintenant la fréquence constante on a mesuré la puissance absorbée. Les résultats obtenus dans ces conditions sont résumés dans le tableau 2.

TABLEAU N° 2

NUMÉRO MESURE de la	AMPÈRES I	VOLS U	KILOWATTS P	P.P.S. F	COS Φ
1	2	5050	9,85	50,5	0,60
2	7,15	5570	14,5	50,5	0,21
3	7,20	5580	14,72	50,5	0,21
4	19	6180	24,35	50	0,12
5	19	6180	24,45	51	0,12

L'examen de la courbe P. (U) (fig. 1), correspondant aux deux cas ci-dessus montre qu'à une tension déterminée la puissance absorbée est plus faible dans le second cas que dans le premier. Par exemple, pour 5.570 volts on a respec-

tivement 17 kilowatts et 14,5 kilowatts. Dans le second cas, la puissance dissipée est plus faible de 15 à 17 % par rapport au premier. Le facteur de puissance s'est amélioré sensiblement dans le second cas.



Ces résultats nous ont conduit à étudier la mesure des pertes à vide, dans les transformateurs. L'anomalie constatée dans les mesures précédentes peut, en effet, provenir :

soit de l'erreur introduite dans les mesures, ainsi qu'il est connu, par les décalages introduits par les transformateurs de mesure assurant l'alimentation des appareils de mesure, soit d'un phénomène accompagnant le fonctionnement du transformateur sur la ligne haute tension à vide, c'est-à-dire sur un circuit se comportant comme une capacité.

Dans ce but, nous avons effectué une série d'essais sur des transformateurs monophasés et triphasés, alimentant au secondaire un circuit uniquement constitué par des capacités.

Avant d'entreprendre cette étude, nous allons examiner sommairement les causes probables des erreurs dans les mesures de ce genre :

a) Erreur introduite par le wattmètre :

Rappelons tout d'abord l'erreur systématique du wattmètre. Nous avons entre la puissance vraie Pv et la puissance lue P_l au wattmètre la relation suivante :

$$Pv = P_l \frac{1 + tg^2 \varphi}{1 + tg \varphi \, tg \Phi}$$

Pv étant la puissance vraie, P_l la puissance lue telle qu'elle résulte de l'étalonnage du wattmètre effectué en courant continu;

φ le décalage du courant dans le circuit à fil fin du wattmètre par rapport à la tension aux bornes de l'appareil d'utilisation et Φ le déphasage propre du circuit d'utilisation.

Quand tg Φ est plus grand que 0,5, Pv ne diffère pas de P_l; mais si tg Φ est faible (plus petit que 0,5) il faut corriger la valeur lue. Tgφ étant faible, on peut négliger $tg^2\varphi$ et écrire.

$$Pv = P_l \frac{1}{1 + tg \varphi \, tg \Phi}$$

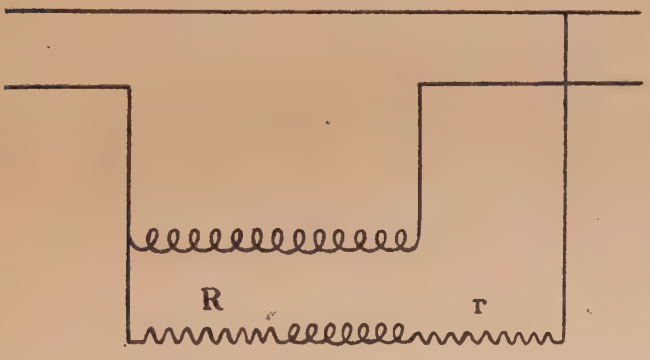
Posons $tg\varphi \, tg\Phi = x$, nous avons :

$$Pv = \frac{P_l}{1 + x}$$

M. Chaumat a proposé plusieurs méthodes pour trouver la puissance vraie.

L'une de ces méthodes est la suivante : La bobine dérivée du wattmètre peut être considérée comme formée de trois parties : la self et la résistance propres de la bobine et une résistance additionnelle; on fait une première mesure et on a :

$$(1) \qquad Pv = \frac{P_1}{1 + x}$$



Dans une seconde opération, on met en service une bobine supplémentaire, ayant la même résistance et le même coefficient du self que la bobine mobile du wattmètre, que l'on substitue à une partie des résistances additionnelles du wattmètre.

La résistance totale du circuit à fil fin n'étant pas changée, le coefficient de self induction étant devenu deux fois plus grand, tgφ adoublé; on a :

$$(2) \qquad Pv = \frac{P_2}{1 + 2x}$$

On peut éliminer x entre les équations 1 et 2; on obtient:

$$Pv = 2\,P_1 - P_2$$

D'ailleurs, on peut calculer x :

$$x = \frac{P_2 - P_1}{2\,P_1 - P_2}$$

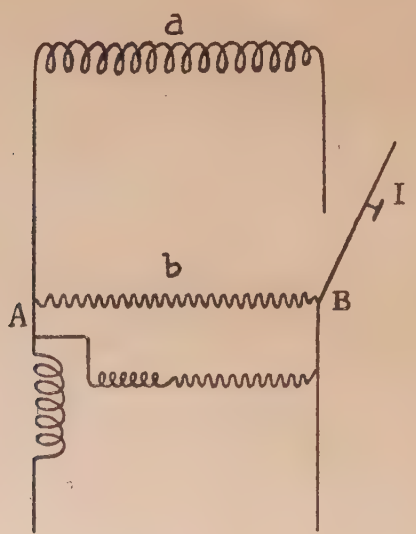
Nous avons employé cette méthode en nous servant de deux wattmètres identiques à deux sensibilités : 120 volts et 240 volts.

Dans une première série de mesures nous avons inséré dans le circuit d'utilisation un seul wattmètre. La bobine dérivée était sur la sensibilité de 240 volts.

Dans une seconde série de mesures, nous avons mis en série les deux bobines 120 volts de deux wattmètres.

Une autre méthode due à M. CHAUMAT pour éliminer le coefficient de correction du wattmètre dans les cas anormaux, est la suivante :

On a un circuit très capacitif ou très inductif, soit AaB ce

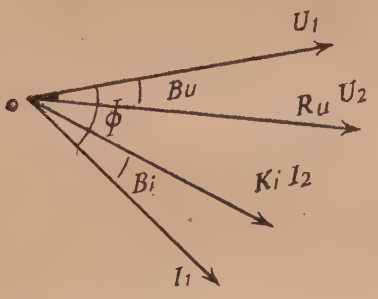


circuit. On double ce circuit par un circuit AbB non inductif. On mesure la puissance totale dans le circuit a et b augmentée de la puissance consommée par le circuit fil fin du wattmètre.

On ouvre l'interrupteur I et on ramène la différence de potentiel très exactement à la même valeur. On obtient ainsi la puissance dépensée dans le circuit AbB. En faisant la différence entre ces deux puissances on trouve la puissance vraie du circuit inductif ou capacitif.

b) Erreur introduite par les transformateurs de mesure.

Soit à mesurer une puissance complexe :
$P_\alpha = U_1 I_1 \cos(\Phi - \alpha)$, Φ de phasage entre U_1 et I_1.



α= un angle qui caractérise la puissance. Supposons que la mesure est faite à l'aide d'un wattmètre de puissance complexe, alimenté par un transformateur de tension de rapport de transformation m_1 et un transformateur d'intensité de rapport m_2.

β_1 et β_2 étant les déphasages entre U_2 et U_1 (tension secondaire et primaire du transformateur de potentiel) et entre I_2 et I_1 (courant secondaire et courant primaire du transformateur d'intensité).

Par convention β_1 est considéré positif si U_2 est déphasée en arrière de U_1; β_2 est positif si I_2 est déphasé en avant sur I_1.

La puissance mesurée par le wattmètre est :

$$P'_\alpha = m_1 \; m_2 \; U_1 \; I_1 \cos(\Phi - \alpha - \beta_1 \beta_2)$$

L'erreur relative introduite par les transformateurs de mesure sera :

$$\varepsilon = \frac{P'_\alpha - P_\alpha}{P_\alpha} = \frac{m_1 \; U_2}{U_1} \; \frac{m_2 \; I_2}{I_1} \; \frac{\cos(\Phi - \alpha - \beta_1 - \beta_2)}{\cos(\Phi - \alpha)} - 1$$

Si ε_1 et ε_2 sont les erreurs introduites par les transformateurs de mesure dans la mesure de la tension et du courant, on a :

$$\varepsilon_1 = \frac{m_1 \; U_2 - U_1}{U_1} \qquad \varepsilon_2 = \frac{m_2 \; I_2 - I_1}{I_1}$$

D'où on déduit :

$$\frac{m_1 U_2}{U_1} = 1 + \varepsilon_1 \qquad \frac{m_2 I_2}{I_1} = 1 + \varepsilon_2$$

On a d'autre part :

$$\frac{\cos(\Phi - \alpha - \beta_1 - \beta_2)}{\cos(\Phi - \alpha)} = \cos(\beta_1 + \beta_2) + \sin(\beta_1 + \beta_2)\,\mathrm{tg}(\Phi - \alpha$$

β_1 et β_2 étant très faibles. En les exprimant en radiant on peut écrire :

$$\frac{\cos(\Phi - \alpha - \beta_1 - \beta_2)}{\cos(\Phi - \alpha)} = 1 + (\beta_1 + \beta_2)\,\mathrm{tg}(\Phi - \alpha)$$

$$\varepsilon = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)\,[1 + (\beta_1 + \beta_2)\,\mathrm{tg}(\Phi - \alpha)] - 1$$

En négligeant les produits $\beta\varepsilon$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + (\beta_1 + \beta_2)\,\mathrm{tg}(\Phi - \alpha)$$

En posant $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_t$ et $\beta_1 + \beta_2 = \beta_t$ on a :

$$\varepsilon = \varepsilon_t + \beta_t\,\mathrm{tg}(\Phi - \alpha).$$

Puissance active : $\alpha = 0$

$$(1) \quad \varepsilon = \varepsilon_t + \beta_t\,\mathrm{tg}\,\Phi.$$

Circuit triphasé : la formule 1 est valable dans le cas d'un circuit polyphasé. ε_1 et $\Sigma\varepsilon_2$ étant les valeurs moyennes des erreurs introduites par tous les transformateurs de même nature dans la mesure de la tension et des courants. β_1 et β_2 en radians les valeurs moyennes de déphasage de ces transformateurs.

Nous avons eu à notre disposition plusieurs genres d'appareils. Nous avons fait, successivement des mesures sur des transformateurs triphasés et des transformateurs monophasés.

CHAPITRE PREMIER

Transformateur triphasé constitué par trois transformateurs monophasés de 25 Kva

Nous avons trois transformateurs monophasés identiques de la Compagnie Générale Electrique Nancy n^{os} 6.181, 6.182 et 6.183.

Caractéristiques de ces appareils :

Tension primaire : 240 volts;
Courant primaire : 100 ampères;
Tension secondaire : 200 volts;
Courant secondaire : 124 ampères;
Puissance : 25 KVA;
Fréquence : 50 P. P. S.

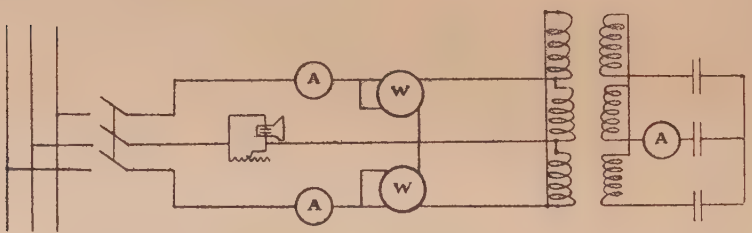
Nous avons fait plusieurs séries d'expériences sur ces transformateurs. Nous les avons montés tantôt en étoile, tantôt en triangle. Leur secondaire alimentait un circuit uniquement constitué par des capacités. Dans une première série de mesures, nous avons relevé directement la valeur de la puissance et du courant absorbés au primaire; dans une autre, pour les mêmes fonctionnements, nous avons relevé les valeurs du courant et de la puissance avec des transformateurs d'intensité.

L'oscillographe cathodique portatif nous donnait dans chaque cas la forme de la courbe du courant au primaire, ce qui a permis de suivre sa modification progressive.

1° Les trois primaires sont montés en triangle et alimentés par le réseau, les trois secondaires montés en étoile débitent sur des capacités;

2° La puissance absorbée est mesurée directement par la méthode des deux wattmètres.

Les ampèremètres, les voltmètres et les wattmètres utilisés, sont électrodynamiques.



Résultats. — Le tableau 3 résume les valeurs obtenues.

I_1 étant le courant primaire en ampères;

I_2 le courant secondaire en ampères;

U_1 la tension primaire entre phases en volts;

U_2 la tension secondaire entre phases en volts;

P_1 la puissance absorbée par le primaire en watts;

k_c le facteur de puissance calculé d'après la formule;

k_p le facteur de puissance calculé d'après le rapport;

k_d le facteur de puissance déduit du diagramme des courants.

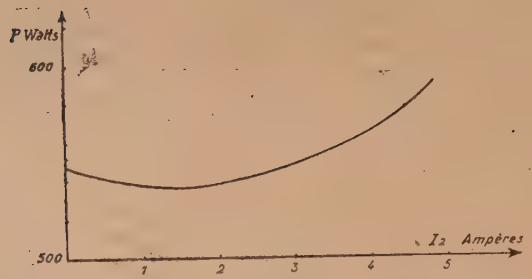
Le rapport de transformation :

$$m = \frac{U_1}{U_2} = 0{,}714$$

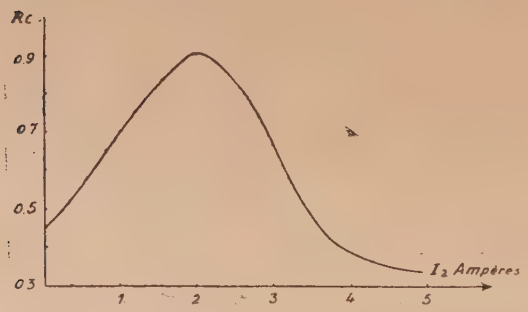
TABLEAU 3

N° de la mesure	L_1 Ampères	L_2 Ampères	U_1 Volts	U_2 Volts	P_1 Watts	C μFarads	Rc	Kp	Kd
1	3,035	vide	230	322	550	vide	0,452	0,456	0,47
2	2,56	0,395	230	322	545	7	0,525	0,540	0,57
3	2,12	0,83	230	322	539	14	0,635	0,657	0,65
4	1,81	1,21	233	327	548	21	0,750	0,784	0,83
5	1,51	1,65	232	325	535	28	0,885	0,951	0,97
6	1,49	1,86	230	322	532	31,5	0,93	0,985	0,98
7	1,48	1,97	232	325	547	34	0,925	0,999	0,99
8	1,45	2,02	230	322	538	35	0,930	0,998	0,92
9	1,59	2,37	231	323	542	41	0,855	0,91	0,92
10	1,89	2,77	230	322	544	48	0,74	0,755	0,78
11	2,3	3,14	228	319	530	55	0,58	0,604	6,655
12	2,8	3,57	227	315	542	62	0,492	0,503	0,54
13	3,37	3,77	230	322	526	69	0,39	0,438	0,49
14	3,83	4,4	230	322	580	76	0,378	0,4	0,39
15	4,36	4,8	230,5	323	578	83	0,313	0,342	0,34
16	1,48	2,00	236	330	555	34	0,915	1	

Si nous regardons le tableau 3, nous remarquons que la puissance absorbée reste pratiquement constante au début, mais si on pousse assez loin, c'est-à-dire si on met au secondaire des capacités assez importantes, la puissance augmente d'une façon continue. Le facteur de puissance augmente d'abord avec la capacité, passe par un maximum 0,93, et puis diminue de nouveau. Si l'on calcule sa valeur, soit k_p en utilisant le rapport P_1/P_2 des indications des deux wattmètres, on constate que celle-ci est au début voisine de la valeur k_c déduite du quotient $P\sqrt{3}\ U_1 I_1$. Cependant au fur et à mesure qu'on s'approche du minimum du courant primaire I_{1m}, une différence dont la valeur va en croissant et atteint son maximum pour $I_1 = I_{1m}$ apparait entre k_p et k_c.



Puissance primaire en fonction du courant secondaire.
Courbe représentant les résultats du tableau 3, page 21



Facteur de puissance calculé $Kc = \frac{P}{\sqrt{3}\,UI}$ en fonction du courant secondaire (Tableau 3).

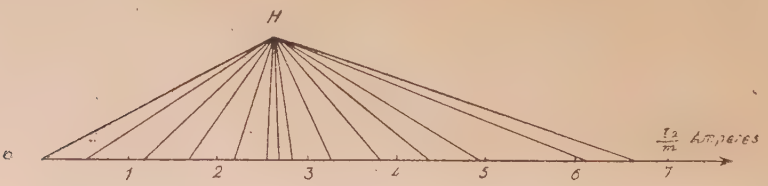


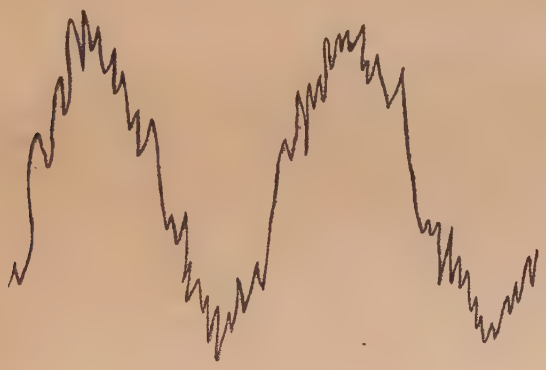
Diagramme des courants $\overrightarrow{I\mu} = \overrightarrow{I_1} + \overrightarrow{\frac{I_2}{m}}$ Tableau IV, page 24

Le facteur de puissance k_a, donné par le diagramme des courants, diffère des deux autres; il est plus voisin de k_p que de k_c.

Si par ailleurs, on examine à l'oscillographe cathodique, la forme de la courbe de courant, on constate que ce dernier ne reste pas sinusoïdal, les harmoniques interviennent et

ont une influence notable (fig. 3). C'est pour cette cause qu'au minimum de courant nous ne trouvons pas un facteur de puissance unité.

La courbe de courant n'est cependant pas très altérée. C'est que dans le cas de triphasé l'harmonique 3 et les multiples de 3 disparaissent.



Cependant, bien que la courbe de courant ne soit pas sinusoïdale, le diagramme des courants donne pour I_1 des valeurs qui, pratiquement, ne diffèrent pas de celles mesurées directement.

Voici comment on peut construire le diagramme des courants : On porte sur un axe ox la valeur de I_2/m, courant secondaire rapporté au primaire. On obtient un point A_1. De A_1 et O comme centres on trace des cercles de rayons I_1 et $I\mu$; $I\mu$ étant le courant absorbé à vide.

Ces deux cercles se coupent en M (fig. 6). On joint M à divers points de l'axe ox. On mesure MA_2, MA_3 ... ce sont les

$$oA_1 = \frac{I_2}{m}$$

$$oM = I\mu$$

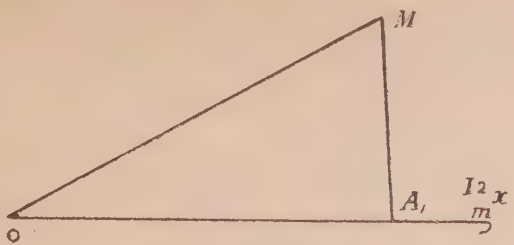


Fig. 6. —

valeurs des courants primaires correspondants (fig.). Le diagramme des courants est l'interprétation de l'équation vectorielle suivante :

$$\overrightarrow{I_\mu} = \overrightarrow{I_1} + \overrightarrow{I_{2/m}}$$

Le tableau 4 donne la comparaison du courant primaire mesuré directement et du courant primaire donné par le diagramme des courants.

TABLEAU 4

I_2 Ampères courant secondaire	0,393	0,83	1,21	1,65	1,86	1,97	2,37	2,77	3,14	3,57	4,4	4,8
I_2/m	0,522	1,16	1,69	2,30	2,60	2,76	2,32	3,88	4,48	5	6,15	6,72
I_1d Ampères courant primaire d'après le diagramme	2,6	2,2	1,78	1,52	1,485	1,48	1,6	1,9	2,27	2,76	3,76	4,3
I_1 Ampères courant primaire mesuré directement	2,56	2,12	1,81	1,51	1,49	1,48	1,59	1,89	2,3	2,8	3,83	4,36

Nous voyons que Id valeur du courant primaire donnée par le diagramme, ne diffère pas sensiblement de I_1, valeur du courant primaire mesurée directement.

La puissance absorbée par le primaire présentant des valeurs assez voisines, à vide et lorsque le courant primaire est minimum, pour déterminer les pertes à vide d'un transformateur, on a intérêt à faire débiter le secondaire du transformateur sur des capacités, de façon à se rapprocher du courant minimum et du facteur de puissance maximum. En effet, en général, le facteur de puissance des gros transformateurs à haute tension étant très faible à vide, les wattmètres n'indiqueront pas la puissance vraie. De plus, l'emploi en H.T. des transformateurs de mesure introduit des erreurs.

Pour supprimer ces erreurs, on peut faire fonctionner le

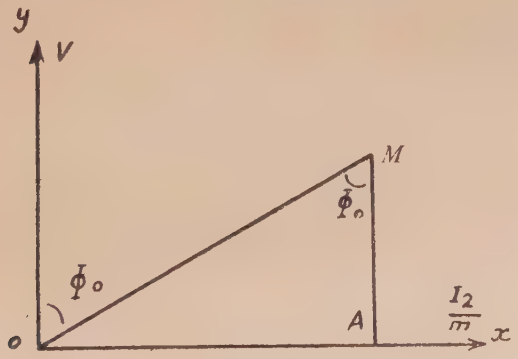
transformateur avec un facteur de puissance élevé au primaire sans changer les pertes.

Ainsi les erreurs dues aux wattmètres deviennent négligeables, et il en est de même de celles introduites par les transformateurs de mesure.

Voici comment on peut obtenir un fonctionnement avec un facteur de puissance au primaire, voisin du facteur de puissance maximum. On fait fonctionner le transformateur à étudier à vide. On déduit de ce premier essai le courant à vide I_μ et le facteur de puissance à vide k_{co}. Le diagramme des courants nous a montré qu'entre k_{co}, calculé d'après la formule habituelle, et le facteur de puissance à vide déduit de ce diagramme, il n'y a pas de différence notable. Leurs valeurs sont, avec une approximation très satisfaisante, en bon accord. k_{co} étant le facteur de puissance à vide, pour avoir le courant secondaire et par suite la valeur de la capacité nécessaire pour obtenir le courant primaire minimum (ce qui correspond aux maximum du facteur de puissance), il n'y a qu'à construire le diagramme des courants.

Soient deux axes rectangulaires ox et oy; de o on trace un segment oM tel que :

$$\widehat{yoM} = \Phi_o \text{ et } oM = I_\mu.$$



De M on abaisse la perpendiculaire MA; MA est le courant primaire minimum, oA le courant secondaire rapporté au courant primaire.

$$\text{De } oA = \frac{I_2}{m} \qquad \text{On déduit : } I_a = m.\ oA.$$

Le secondaire débitant sur des capacités, entre le courant, la tension et la capacité, on a la relation :

$$I_2 = U_2 C\omega = m.\ oA$$

$$c = \frac{m.\ oA}{U_1\ \omega}$$

m : rapport de transformation du transformateur;
oA : mesuré sur le diagramme des courants, en ampères;
U_2 : tension secondaire en volts;
ω : pulsation du courant d'alimentation.
On obtient ainsi la valeur de C en farads.

Cependant, il y a lieu de noter que lors d'un fonctionnement avec capacités au secondaire et en particulier au voisinage du courant minimum, la forme de la courbe de courant est altérée par suite du développement pris par certains harmoniques.

Nous disposons cependant d'une méthode, pour la mesure des pertes à vide, qui élimine les erreurs dues aux wattmètres ainsi que les erreurs dues aux transformateurs de mesures.

Pour trouver la valeur de la capacité correspondant au minimum du courant primaire, on a admis que la valeur de décalage Φ_0 du courant à vide sur la tension pouvait être déduite de la valeur du facteur de puissance à vide. En général, on ne peut pas les confondre. Par suite, pour déterminer la vraie valeur de C il est préférable d'envisager deux fonctionnements :

a) Essai à vide;
b) Essai sur une capacité quelconque.

On obtiendra ainsi le point M avec une précision plus grande. De ce fait, la valeur de la capacité donnant le minimum du courant primaire sera connue avec une très bonne approximation.

Le courant n'étant pas sinusoïdal, parler du déphasage du courant vis à vis de la tension, n'a pas de sens. On peut se demander à quoi correspond le déphasage donné par le diagramme des courants.

Connaissant la puissance mesurée par le wattmètre au

minimum du courant primaire, connaissant d'autre part la tension U_1 entre phases ainsi que l'angle U_2, If nous pouvons déterminer la vraie valeur du fondamental sans avoir recours à une méthode mathématique compliquée.

Tout ce que nous venons de dire ci-dessus est valable dans tous les cas que nous avons étudiés, qu'il s'agisse de transformateurs monophasés ou de transformateurs triphasés, qu'il s'agisse de transformateurs fonctionnant en surtension ou en sous-tension.

II. Les trois transformateurs fonctionnent en surtension.

1° Mesures directes.

Les B. T. montées en triangle sont alimentées par le réseau. Les H. T. montées en triangle débitent sur des capacités variables. Le tableau 5 donne les résultats correspondants :

TABLEAU 5

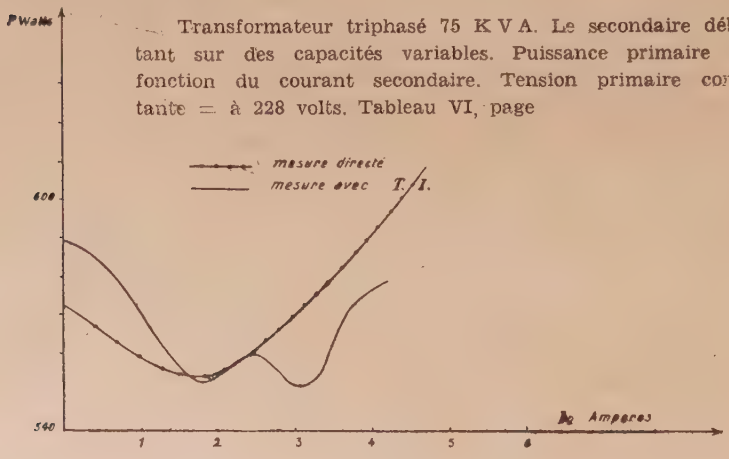
N° de la mesure	I_1 Ampères Courant primaire	I_2 Ampères Courant secondaire	U_1 Volts Tension primaire	U_2 Volts Tension secondaire	P Watts Puissance	C M Farads Capacité par phase au secondaire	Ke	Kp	Kd	$I_1 d$ Ampères
1	6,67	vide	222	276	810	vide	0,317	0,326	0,36	
2	6,25	0,34	221	276	809	7	0,337	0,342	0,38	6,2
3	5,80	0,7	221	276	790	14	0,355	0,365	0,41	5,8
4	5,40	1,025	221	276	781	21	0,378	0,397	0,43	5,42
5	5,06	1,4	220	272	795	28	0,410	0,423	0,47	5
6	4,49	1,65	220	272	764	35	0,445	0,472	0,5	4,7
7	4,20	1,99	221	273	765	41	0,472	0,490	0,54	4,3
8	3,87	2,35	220	272	770	48	0,52	0,557	0,59	4
9	3,47	2,675	221	274	767	55	0,577	0,616	0,625	3,75
10	3,22	3,01	221	274	775	62	0,630	0,659	0,7	3,4
11	3	3,34	221	276	780	69	0,675	0,707	0,76	3,0
12	2,37	4,03	222	276	786	83	0,805	0,857	0,9	2,65
13	2,37	4,7	221	276	787	96	0,875	0,99	0,99	2,37
14	2,35	4,82	222	276	798	99	0,907	0,999	0,998	2,35
15	2,45	5,07	221	276	785	103	0,89	0,995	0,998	2,35
16	2,42	5,45	222	276	767	110	0,86	0,952	0,96	2,45
17	2,52	5,8	221	274	785	117	0,815	0,895	0,92	2,6
18	2,75	6,27	222	276	797	124	0,755	0,809	0,82	2,85
19	3,92	6,39	224	278	804	131	0,525	0,755	0,76	3,1
20	4,3	8,13	224	278	810	165	0,485	0,565		
21	5,68	9,3	224	278	850	207	0,387	0,407		

Nous remarquons que rien n'est changé en ce qui concerne les résultats. Les transformateurs fonctionnent en surtension, la courbe du courant est plus altérée que précédemment. Par suite le facteur de puissance calculé à partir des grandeurs mesurées est plus faible (colonne 8 du tableau 5).

III. Même fonctionnement.

Mesures directes.

Les trois transformateurs monophasés 25 KVA constituent un transformateur triphasé. Les trois primaires montés en



Transformateur triphasé 75 K V A. Le secondaire débitant sur des capacités variables. Puissance primaire en fonction du courant secondaire. Tension primaire constante = à 228 volts. Tableau VI, page

triangle sont alimentés par le réseau. Les trois secondaires montés en étoile débitent sur des capacités.

A l'aide d'un jeu d'interrupteurs, nous avons pu mesurer simultanément les courants et les puissances : d'abord directement, ensuite par l'intermédiaire de transformateurs de mesure, sans que la consommation des appareils utilisés pour les mesures de la seconde série intervienne dans celles de la première et inversement.

Nous avons corrigé ensuite les résultats obtenus, des erreurs existant sur le rapport de transformation des transformateurs d'intensité et de ce fait des erreurs introduites sur la valeur de la puissance mesurée indirectement. Nous désignons par P'i cette puissance corrigée.

Le tableau 6 résume les résultats de cet essai. La tension d'alimentation ayant varié, pour avoir la puissance à une tension constante, 228 volts par exemple, nous admettons qu'elle est proportionnelle au carré de la tension. P étant la puissance à U volts, pour avoir la puissance à 228 volts on multiplie P par 228^2 et on la divise par U^2, soit P_1 cette quantité. Calculons $P_1 d$ et $P'_1 i$.

TABLEAU 6

N° de la mesure	U_1 Volts Tension primaire	I_2 Ampères Courant primaire mesuré directement	P_1 Watts Puissance mesurée directement	$I_1 i$ Ampères Courant primaire avec T. I.	$P_1 i$ Watts Puissance mesurée avec T.I.	I_2 Ampères Courant secondaire	Cu Farads Capacité par phase du secondaire	$P'_1 i = P_1 i \frac{I_1 d}{I_1 i}$ watts	$P_2 d = P_1 d \frac{228^2}{U^2}$ watts	$P'_2 d = P'_1 i \frac{228^2}{U^2}$ watts
1	232	3,8	592	3,807	610	0	0	610	575	592
2	226	3,35	570	3,335	585	0	7	587	588	586
3	229,5	2,88	575	2,83	580	0,7	14	591	568	584
4	231	2,44	575	2,36	568	1,07	21	587,5	562	575
5	250,5	2,01	564	1,97	558	1,45	28	569	552	558
6	230	1,73	562	1,7	556	1,8	35	565,7	554	557
7	230	1,57	563	1,55	553	2,12	42	559	555	551
8	228	1,53	559	1,46	534	2,45	49	559	559	559
9	227	1,65	558,5	1,59	533,1	2.8	56	554	564	560,5
10	227,5	1,91	566,5	1,85	527	3,17	63	546	570	540
11	228	2,25	575,5	2,16	532	3,51	70	555	575,5	555
12	228	2,66	583	2,6	556	3,84	77	570	583	570
13	228	3,06	587	3,0	563	4,29	84	574,5	587	574,5
14	228	3,54	600	3,47	574	4,63	81	580	600	580
15	228	3,99	610	3,93	581	4,99	98	589	610	589
16	227	4,32	605	4,25	582	5,25	105	592	611	598
17	226	4,79	610	4,73	486	5,59	112	594	622	606

Recherchons Cos Φ à vide dans les deux cas.

1° Mesure directe :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_2\, d}{\sqrt{3}\, U_1\, I_1} = \frac{575}{\sqrt{3} \times 228 \times 3,8} = 0,383$$

2° Mesure avec T.I :

$$\cos (\varphi_0 + \beta_1) = \frac{P'_2\, i}{\sqrt{3} \times 228 \times 3,8} = 0,396$$

$$\Phi_0 = 66° 30'$$
$$\Phi_0 + \beta i = 22'$$

d'où : $\beta i = - 48'$

Si nous construisons les deux courbes $P_2 d(I_2)$ et $P'_2 i\ (I_2)$, nous voyons qu'au commencement, le décalage du courant primaire vis à vis de la tension étant positif, βi se retranche de Φ_0. Aux environs du minimum Φ tendant vers zéro, un décalage de l'ordre du degré n'a pas grande importance sur la valeur de Cos Φ et par suite sur la puissance. Quand le courant est décalé en avant sur la tension, βi étant négatif s'ajoute à Φ et on trouve une puissance plus faible que la puissance réelle.

Ces résultats nous montrent qu'on a intérêt, afin de réduire et éliminer les erreurs des transformateurs de mesure, à faire fonctionner l'appareil aux environs du courant minimum.

Nous constatons en outre que la puissance passe par un minimum. Il est vrai que ce minimum n'est pas très éloigné de la puissance à vide; il y a seulement 4 % de différence.

CHAPITRE II

A) Etude d'un transformateur monophasé

C'est un transformateur de la Compagnie Générale Electrique Nancy n° 6.481.

Puissance : 25 KVA;	Fréquence : 50 ppS;
Volts : Primaire 200;	Ampères : Secondaire : 100.
Ampères : Primaire 124;	Volts : Secondaire 240;

Nous avons fait sur ce transformateur plusieurs séries d'essais. Tout d'abord nous l'avons alimenté du côté basse tension (le transformateur fonctionnant en surtension) puis du côté haute tension, tension normale. Dans une troisième série de mesures nous l'avons alimenté, en sous-tension, avec un auto-transformateur. Nous avons modifié la tension progressivement, afin d'étudier l'influence de la saturation sur la forme de la courbe de courant et par suite sur le facteur de puissance.

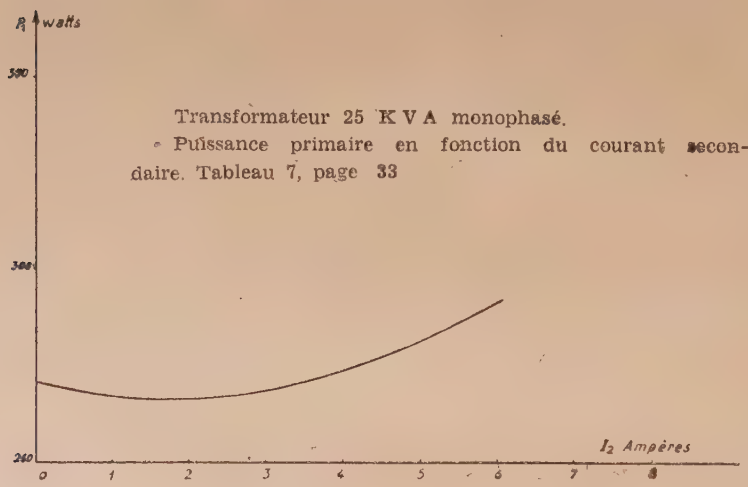
Nous avons enfin employé une des méthodes de M. CHAUMAT pour la mesure de la puissance.

Les appareils utilisés sont des appareils étalons électrodynamiques.

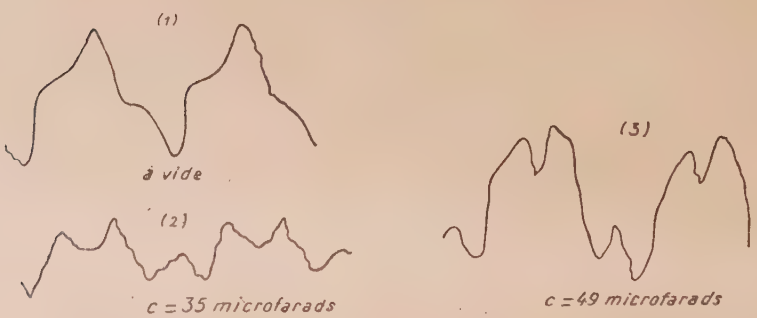
1° **B. T. alimentée par le réseau à tension constante** : H. T. débitant sur des capacités variables.

Nous avons utilisé le montage donné (fig. 8). L'oscillographe cathodique portatif nous a permis pendant les essais de relever la forme de la courbe de courant.

P_1 : étant la puissance primaire en watts;
P_2 : en watts la puissance à 226 volts;
I_1 : courant primaire en ampères;
I_2 : courant secondaire en ampères;
U_1 : tension primaire en volts;
U_2 : tension secondaire en volts;
C : capacité mise sur le circuit secondaire en microfarads;



Transformateur 25 K V A monophasé.
Puissance primaire en fonction du courant secondaire. Tableau 7, page 33



Transformateur monophasé 25 K V A. Courbes de courant primaire relevées à l'oscillographe cathodique le secondaire débitant sur des capacités variables. Tableau 7, page

(1) Courbe du courant à vide.
(2) Courbe du courant au minimum primaire.
(3) Courbe du courant au delà du minimum.

k_c : facteur de puissance calculé d'après la formule :

$$kc = \frac{P_1}{U_1 \; I_1}$$

Le tableau 7 résume les résultats.

TABLEAU 7

N° de la mesure	U_1 Volts	U_2 Volts	I_1 Ampères	P_1 Watts	I_2 Ampères	C M Farads	Kc	$P_2 = P_1 \frac{226^2}{U_1{}^2}$
1	226	282	4,32	277	0	0	0,277	271
2	222	276	3,98	261	0	0	0,296	271
3	222	276	3,63	261	0,40	4,6	0,324	271
4	227	»	3,75	270	0,60	7	0,317	268
5	227	»	3,54	269	0,91	10,5	0,344	267
6	226	»	3,09	267	1,27	14	0,382	267
7	226	282	2,83	265	1,57	17,5	0,414	264
8	226	»	2,30	267,4	2,50	28	0,513	267
9	226	»	2,27	267	2,74	31,5	0,32	267
10	226	»	2,24	268,5	3,03	35	0,531	268,5
11	226	»	2,28	271	3,2	36,5	0,526	271
12	226	»	2,30	269	3,32	38,5	0,518	269
13	226,5	»	2,43	273,5	3,66	42	0,496	272
14	226	»	2,63	273,5	4	45,5	0,46	273,5
15	226,5	»	2,82	277	4,35	49	0,434	276
16	222	»	3,03	271	4,50	52,5	0,403	281
17	226,5	»	3,32	284	4,92	56	0,378	283
18	222	»	3,58	272	5,2	59,5	0,342	273
19	222	276	3,90	275	5,5	63	0,318	286
20	222	»	4,11	279	5,75	66,5	0,306	290
21	222	»	4,42	281	6,05	70	0,286	292

Nous constatons que la puissance diminue très légèrement au commencement, passe par un minimum et croit ensuite avec la capacité. Le minimum de la puissance n'est pas très loin de la puissance à vide, 7 watts de différence sur 270,

c'est-à-dire 2,5 %. Le minimum de la puissance ne coïncide pas exactement avec le minimum du courant primaire.

Le facteur de puissance calculé par la formule habituelle :

$$Kc = \frac{P_1}{U_1 \; I_1}$$

croît avec le courant secondaire, passe par un maximum qui est très loin de l'unité (0,53) et diminue ensuite. Le transformateur fonctionne en surtension, nous avons alimenté le côté B. T. du transformateur dont la tension normale est de 200 volts, par la tension composée du réseau 226 volts, la courbe du courant est considérablement altérée comme le montre le cliché donné par l'oscillographe cathodique. Au prime abord on pourrait se demander pourquoi le facteur de puissance ne passe pas par l'unité. On pourrait en conclure que l'un des deux appareils (l'ampéremètre ou le wattmètre) est faux. Nous verrons par la suite d'après les relevés oscillographiques à l'oscillographe Blondel que le wattmètre donne seulement la puissance: $P_1 = U_1 I_1 f \cos \Phi_1$.

($I_1 f$ étant la valeur efficace du fondamental, Φ_1 le décalage entre la tension et le fondamental) tandis que l'ampèremètre quand le courant n'est pas sinusoïdal fournit une valeur du courant qui ne correspond pas avec la valeur réelle de ce courant.

Bien que la courbe du courant ne soit pas sinusoïdale, le diagramme des courants donne des résultats satisfaisants et au minimum la relation :

$$\overline{I_\mu}^2 = \overline{I_m}^2 + \overline{\frac{I_2}{m}}^2$$

où :

I_μ : est le courant primaire à vide;

Im : le minimum du courant primaire;

I_2 : le courant secondaire correspondant au minimum du courant primaire;

m : le rapport de transformation,

est vérifié avec une très grande approximation.

Nous avons, en effet :

$I\mu = 4.43$ Ampères $\quad \overline{I\mu}^2 = 19.27$ Ampères.

$Im = 2.24$ Ampères $\quad \overline{Im}^2 = 5.01$

$m = 0.802$ $\quad \frac{I}{m} = 1.248$

$I_2 = 3.03$ Ampères $\quad \frac{I_2}{m} = 3.76$ Ampères. $\left(\overline{\frac{I_2}{m}}\right)^2 = 14.22$

$\overline{Im}^2 + (I_{2/m})^2 = 5.01 + 14.22 = 19.23$

Construisons le diagramme des courants :

Sur un axe nous portons une longueur : $oA = I_{2/m} = 3{,}77$ ampères. De A nous élevons la perpendiculaire et nous construisons le triangle oAM :

$$oA = I_2/m;\ AM = Im;\ oM = I\mu.$$

Nous prenons dans notre tableau les valeurs I_2 du courant secondaire. Nous portons sur l'axe ox des segments oA_1, oA_2 tels que $oA_1 = \frac{I_2}{m}$... Nous obtenons ainsi des points A_1, A_2... Nous joignons MA_1, MA_2...

La relation vectorielle $\overrightarrow{I\mu} = \overrightarrow{I_1} + \overrightarrow{\frac{I_2}{m}}$ doit être vérifiée pour toutes les valeurs de I_1 et de I_2. Par suite MA_1, MA_2, doivent être égales aux valeurs correspondant de I_1 mesurées directement.

Le facteur de puissance est donné par le Cos. de l'angle que font oM, A_1M, A_2M... avec oy, oy étant l'axe perpendiculaire à ox. Nous voyons d'après le diagramme des courants qu'au minimum du courant primaire le facteur de puissance passe par l'unité.

Les résultats déduits du diagramme des courants sont donnés dans le tableau 8.

I_1 : étant le courant primaire mesuré directement en ampères;

I_1^d : courant primaire d'après le diagramme en ampères;

k_d : facteur de puissance d'après le diagramme;

k_c : facteur de puissance calculé d'après la formule habituelle.

TABLEAU 8

N° de mesure	I_2 Ampères	I_2/m Ampères	I_1 Ampères	Id Ampères	Kc	Kd
1	0,60	0,75	5,75	5,75	0,317	0,59
2	1,27	1,575	3,09	3,15	0,382	0,71
3	1,57	1,96	2,83	2,85	0,414	0,77
4	2,50	5,12	2,30	2,32	0,513	0,955
5	3,03	5,775	2,24	2,24	0,531	1
6	3,3	4,12	2,30	2,27	0,518	0,985
7	4	5	2,63	2,55	0,46	0,87
8	4,35	5,45	2,82	2,8	0,434	0,8
9	4,92	6,14	3,32	3,26	0,378	0,68
10	0	0	4,39	4,39	0,277	0,51

Nous voyons que la différence entre I_1 et I_d est minime, tandis que k_d est très différent de k_c.

2° **Mêmes essais :** l'ampéremètre et la bobine série du wattmètre étant alimentés par un transformateur d'intensité.

Le montage est identique, nous avons inséré dans le primaire un transformateur d'intensité (primaire 10 ampères; secondaire 5 ampères). La tension est la même que dans l'essai précédent. Nous avons fait les deux essais simultanément.

Résultats : Le tableau 9 nous donne les résultats.

Nous avons mesuré le courant primaire simultanément avec deux ampéremètres dont l'un est inséré dans le secondaire de T.I. Nous remarquosn que le rapport de transformation du T.I. ne reste pas exact, quand le courant n'est pas sinusoïdal. En effet, à vide la courbe de courant n'étant pas

TABLEAU 9

Nr de mesure	V_1 Volts Tension primaire	I_1 Ampères Courant primaire	P_1 Watts Puissance	I_2 Ampères Courant secondaire	Cp. Farads Capacité au secondaire
1	222	4	282	0	0
2	227	3,72	286	0,60	7
3	227	3,39	278	0,91	10,5
4	226	3,01	270	1,27	14
5	226,5	2,80	267	1,57	17,5
6	226	2,35	258	2,50	28
7	226	2,20	256,5	2,74	31,5
8	226	2,15	253	3,03	35
9	226	2,18	258	3,2	36,5
10	226	2,20	255	3,32	38,5
11	226,5	2,315	259	3,66	42
12	226	2,48	252	4	43,5
13	226,5	2,66	250,2	4,35	49
14	222	2,86	236,5	4,50	52,5
15	226,5	3,12	250,6	4,92	56
16	222	3,39	234,5	5,2	59,5
17	222	3,69	228,5	5,5	63
18	222	4,19	230,5	6,05	70

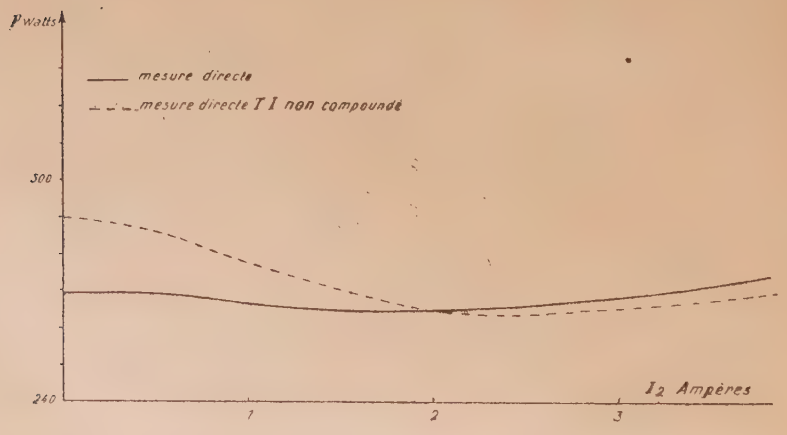
très altérée les deux valeurs de courant sont les mêmes. Mais au fur et à mesure qu'on met des capacités au secondaire la divergence entre les deux valeurs du courant primaire, augmente.

Dans la valeur de la puissance, il y a deux sortes d'erreurs : la première provient de la variation du rapport de transformation du T.I., la seconde de l'angle de décalage du T.I. Pour éliminer la première, nous avons multiplié la valeur de la puissance mesurée dans la seconde série de mesures, par le rapport I_d/I_i. Id étant le courant mesuré directement et Ii le courant primaire mesuré au secondaire du T.I. soit P'_1 sa valeur.

Comparons P'_1 à la valeur de la puissance mesurée directement, nous avons :

TABLEAU 9 *bis*.

P_1 Watts	271	270	269	267	267	267	267
P'_1 Watts	291	287	285	273	270	264	266
U_1 Volts	226	227	226	226	226,5	226	266
J_2 Ampèses	0	0,60	0,81	1,27	1,57	2,50	2,74
P_2 Watts	268	271	269	273	273	277	284
P'_1 Watts	265	270	267	271	273	265	265
U_1 Vols	226	226	226	226,5	226	226,5	226,5
J_2 Ampères	3,03	3,2	3,32	3,66	4	4,35	4,92



Transformateur 25 K V A dont le secondaire débite sur des capacités variables.

Comparaison des puissances mesurées directement et avec T. I. non compoundé.

Nous avons construit les deux courbes $P'_1(I_2)$ et $P_1(I_2)$. Nous voyons qu'au commencement P'_1 est plus grand que P_1

au fur et à mesure que nous nous approchons du minimum de courant primaire P'_1 s'approche de P_1. Quand nous dépassons le minimum nous voyons que P'_1 est plus faible que P_1. Cela s'explique par le fait que le décalage du T.I. gardant un signe constant, n'intervient pas de la même façon quand le courant est en retard ou en avance sur la tension. Entre le fonctionnement à vide et le minimum du courant primaire l'angle de décalage du Φ.I étant négatif, nous avons un angle Φ plus faible que l'angle Φ réel. Par suite un Cos. Φ plus grand. Au delà du minimum cet angle s'ajoutant à Φ réel nous avons un décalage total plus grand : par suite un Cos. Φ plus faible, la puissance dissipée est donc plus faible.

Le transformateur d'intensité employé nous donnerait un décalage de l'ordre de 3° à 4°.

Nous avons fait le même essai avec un transformateur d'intensité compoundé et de fabrication plus soignée. Nous verrons, après avoir donné les résultats, que la différence entre la puissance mesurée directement et indirectement n'est pas grande et que le décalage introduit par le T.I. est à peine de l'ordre du degré. Même un décalage de un degré dans le cas de la mesure de puissance à vide d'un transformateur de grande puissance où le facteur de puissance n'est que de 0,1 peut apporter une erreur appréciable dans la mesure.

A un Cos. Φ = 0,105 correspond un angle Φ = 84°.

Si nous prenons 83° ou 85° nous avons pour le Cos. Φ les deux valeurs suivantes 0,122 et 0,087. Nous avons donc une erreur de 16 % en plus ou en moins.

3° **Même essai avec T. I. compoundé.** — T.I. : primaire : 10 ampères. Secondaire : 10 ampères. Les appareils employés sont des appareils électro-dynamiques. Le transformateur d'intensité est compoundé. Les résultats sont donnés par le tableau 10.

TABLEAU 10

N° de la mesure	U_1 Volts Tension primaire	$I_1 d$ Ampères Courant primaire mesuré primaire	I_1 ic Ampères Courant primaire avec TI compoundé	I_1 inc Ampères Courant primaire avec TI npnn compoundé	P_1 Watts Puissance mesurée directement	P_1 ic Watts avec TI compoundé	P_1 inc Watts avec TI non compoundé	I_2 Ampères Courant secondaire	C_u Farads Capacité au secondaire
1	218	4,35	4,2	2,18	260	267	269	0	0
2	218	3,8	3,67	3,66	259	264	262,5	0,565	7
3	218	3,22	3,11	3,1	260	262	259,0	1,12	14
4	219	2,79	2,72	2,70	260	262	256,5	1,685	21
5	218	2,39	2,34	2,31	261,5	258	250	2,33	28
6	217	2,26	2,205	2,175	257,5	255	248,0	2,56	32
7	218,4	2,32	2,23	2,205	263,5	256	250	2,85	35
8	217,6	2,42	2,37	2,32	265	258	250	3,39	42
9	218,2	2,48	2,43	2,41	266,5	256	250	3,69	45
10	217,2	2,66	2,575	2,575	267,5	251	245	4,0	49
11	219,6	3,16	3,09	3,07	266,5	258	255	4,67	56
12	219	3,72	3,66	3,82	271,5	251	252,5	5,28	63
13	222,6	4,28	4,17	4,14	285	265	262,5	6,05	70

Nous allons faire la correction du rapport de transformation du T. I.; nous corrigerons P_1 inc et P_1 inc et nous comparerons les valeurs obtenues à celles relevées directement.

P'_1 ic devient $P_1{}^1$ ic et P_1 inc, P'_1 inc

$$P'_1 ic = \frac{I_1 d}{I_1 ic} \times P_1 ic \qquad P''_1 inc = P_1 inc \frac{I_1 d}{I_1 inc}$$

P_1	Watts	260	259	268	260,5	261,5	259,5	263,5	265	260.5	267.5	266,5	271,5
P'_1 ic	Watts	277	272	271	268	263	260	261.5	264	261	260	264	255
P'' inc	Watts	280	272	269	265	259	258	258,5	260,5	256	253	263,5	259

Nous voyons qu'à vide la différence entre la puissance mesurée directement et la puissance mesurée avec T. I. puis corrigée, est grande; au fur et à mesure que nous nous approchons du minimum cette différence diminue. De l'autre côté de minimum cette différence s'inverse. La puissance mesurée directement est plus grande que la puissance mesurée avec T. I.

Calculons l'angle de décalage.

Nous avons :

Nous avons : $\text{Cos } \Phi o = \frac{P_1}{U_1 I_1} = \frac{260}{218 \times 4.35} = 0.274$

$$\text{Cos } (\Phi_o + \delta) = \frac{P'ic}{U_1 I_1} = \frac{277}{218 \times 435} = 0.292$$

$$\text{Cos } (\Phi_o + \delta_1) = \frac{P'_1 \text{ inc}}{U_1 I_1} = \frac{280}{218 \times 4.35} = 0.295$$

$\Phi_o = 74^o$ $\quad \Phi_o + \delta = 73^o$ $\quad \varphi_o + \delta^1 = 72^o50'$

Le décalage introduit par le transformateur d'intensité est de un degré dans le cas où le transformateur d'intensité est compoundé, de 70′ dans le cas où le T.I. n'est pas compoundé.

L'angle de décalage est grand. On ne peut s'assurer de la tension. Elle peut varier d'un demi-volt.

Nous voyons que même dans ce cas, un décalage de un degré peut introduire une erreur de 6 %. Pourtant ce n'est pas un transformateur de grande puissance. La tension non plus n'est pas élevée.

4° **Mêmes mesures en attaquant le transformateur du côté H. T. par le réseau.**

TABLEAU 11

N° de la courbe de courant	N° de la mesure	I_1 Ampères Courant primaire	I_2 Ampères Courant secondaire	P Watts Puissances	U_1 Volts Tension primaire	U_2 Volts Tension secondaire	C_μ Farads Capacité mise au secondaire	Kc	Kd	I_1 d Ampères Courant primaire au diagramme
	1	1,96	0	190	238	187	0	0,407	0,58	1,96
	2	1,87	0,13	190	238	187	2,3	0,43	»	»
	3	1,83	0,2	190	238	187	3,5	0,437	»	»
	4	1,71	0,4	190	238	187	7	0,467	0,67	1,70
	5	1,47	0,84	190	238	187	14	0,545	0,78	1,45
	6	1,95	1,24	190	238	187	21	0,62	0,89	1,29
	7	1,13	1,66	192,5	238	187	28	0,67	0,975	1,17
IV	8	1,13	2,07	193	238	187	35	0,715	0,99	1,14
	9	1,135	2,26	194	238	187	38,5	0,71	0,98	1,16
	10	1,17	2,45	194	237	187	42	0,7	»	»
	11	1,137	2,87	196	238	187	49	0,63	0,86	1,32
	12	1,51	3,28	199	236	186	58	0,56	»	»
	13	1,77	3,72	202,5	238	187	63	0,48	0,66	1,76
	14	2,02	3,97	209	238	187	70	0,435	»	»
	15	2,62	4,82	207	232	183	84	0,35	0,46	2,5
	16	2,92	5,02	204	234,5	184	91	0,297	»	»
	17	3,22	5,55	207,5	234,5	184	98	0,263	0,38	3,05
	18	3,55	5,80	212,5	234,5	184	105	0,254	»	»
	19	3,85	6,23	215	234,5	184	112	0,237	0,33	3,55
	20	4,52	7,4	225	232,5	183	119	0,215	»	»
	21	4,82	7,75	212	233	183	133	0,186	0,265	4,42
	22	5,45	8,68	212	234	184	140	0,166	0,22	5,4
V	23	6,07	9,45	230	234	184	147	0,161	»	»
	24	6,22	9,75	235	234	184	165	0,188	0,19	6,22

Dans ce cas, le primaire étant alimenté à une tension voisine de la valeur correspondant à la plaque du transformateur le facteur de puissance est plus élevé. Le maximum dé-

passe, en effet, 0,70, tandis que dans le cas précédent on arrivait à peine à 0,55. Il est à noter que dans ce cas le transformateur est moins saturé. Le diagramme des courants pour le courant primaire donne des valeurs convenables. Tant que la puissance reste constante I_{1d} diffère très peu de I_1 mesuré. Mais une fois le minimum du courant primaire dépassé, la puissance croit et une divergence apparaît entre I_1 mesuré et I_{1d} du diagramme.

5° **Essais en sous-tension.** — On attaque un auto-transformateur par la tension du réseau. Le secondaire de cet auto-transformateur alimente la H. T. du transformateur monophasé 25 KVA.

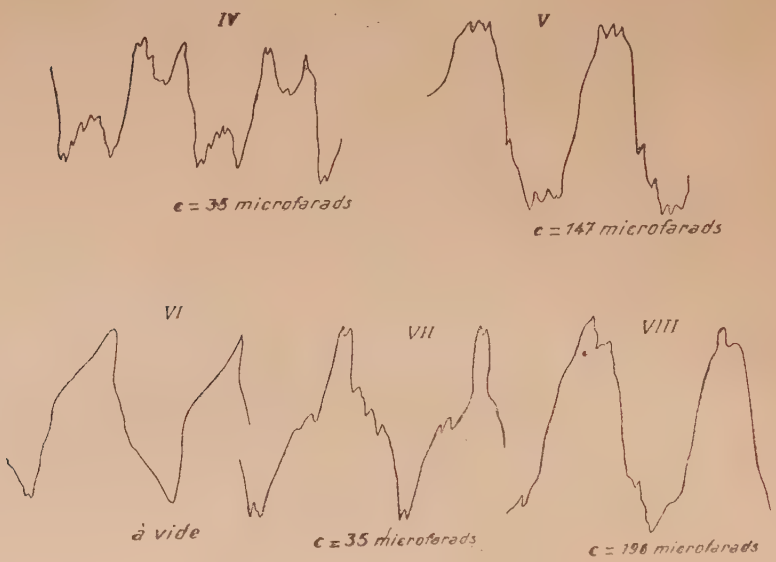
Les appareils employés sont les mêmes.

TABLEAU 12

N° de la courbe du courant	N° de la mesure	I_1 Ampères Courant primaire	I_2 Ampères Courant secondaire	U_1 Volts Tension primaire	U_2 Volts Tension secondaire	P_1 Watts Puissance	$Kc = \frac{P_1}{U_1 I_1}$	Kd Facteur de puissance d'après le diagramme	Id Ampères Courant primaire d'après le diagramme	C_μ Farads Capacité du secondaire
VI	1	1,237	0	188,5	150	125	0,535	0,6	1,237	0
	2	1,18	0,105	188,2	150	126	0,567	»	»	23
	3	1,06	0,325	191	152	126,5	0,63	0,7	1,06	7
	4	1	0,48	190,4	151	125	0,658	0,77	0,97	10
	5	0,91	0,675	190	151	127,5	0,735	0,85	0,88	14
	6	0,845	1	190	151	125	0,780	0,90	0,77	21
	7	0,817	1,36	190	151	127,5	0,82	0,95	0,75	28
	8	0,76	1,54	190	151	130	0,90	0,98	0,75	31,5
VII	9	0,75	1,68	192,5	153	132	0,917	0,95	0,78	35
	10	0,86	2,02	193	153	132,5	0,805	0,77	0,96	42
	11	1,09	2,38	191	152	135	0,654	0,63	1,16	49
	12	1,6	3,09	190	151	135	0,445	0,45	1,64	63
	13	2,1	3,75	190	151	140	0,35	0,34	2,14	70
	14	2,62	4,45	190	151	145	0,292	0,27	2,66	77
	15	3,5	5,5	190	151	147,5	0,225	0,215	3,5	105
	16	3,97	6,1	190	151	165	0,218	0,185	3,94	126
	17	5,3	7,75	192	152	165	0,1635	0,13	5,48	161
VIII	18	6,7	9,52	192	152	175	0,136	0,11	6,7	196

Comme on pouvait le prévoir, la tension d'alimentation étant plus faible, l'induction a diminué et le facteur de puissance s'est amélioré considérablement.

Au minimum du courant primaire nous notons un facteur de puissance de 0,92. Le transformateur n'étant pas saturé, la forme de la courbe de courant n'est pas très altérée;



Transformateur 25 K V A monophasé.

Courbes de courant primaire relevées à l'oscillographe cathodique. Secondaire débitant sur des capacités variables.

IV et V tableau 11, page 41

VI, VII et VIII tableau 12, page 42

les harmoniques ne présentant pas une amplitude très élevée.

En comparant aux résultats obtenus dans l'étude du fonctionnement en triphasé, on constate que tandis que le facteur de puissance était de 0,90, il n'atteint plus dans le cas de la marche en monophasée, sous la même tension, que la

valeur de 0,55. Cette différence provient en particulier de ce que, dans le cas du triphasé, l'harmonique 3 et ses multiples n'intervenant pas, la courbe de courant garde son allure sinusoïdale simplement affectée de dentures d'amplitude assez faible, tandis que dans le cas de la marche en monophasée, l'appareil fonctionnant en surtension, la courbe de courant est totalement changée.

Revenons maintenant à la question du facteur de puissance. Le courant n'étant pas sinusoïdal le facteur de puissance et le Cos. Φ ne sont pas les mêmes. Cependant, nous pouvons parler de décalage Φ. A l'oscillographe Blondel nous relevons la courbe de tension et la courbe de courant réel. Entre les zéros de ces deux courbes nous avons un décalage. Ce décalage est le décalage de courant complexe. Nous verrons par la suite si le Cosinus de cet angle ne coïncide pas avec k^a.

B) ESSAIS SUR UN TRANSFORMATEUR GINDRE DE 2 KVA.

Transformateur n° 3.072.

Le primaire est formé de deux bobines de 110 volts. Le secondaire de douze bobines secondaires de 125 volts.

Dans nos expériences, les douze bobines secondaires sont mises parallèles six à six et nous avons mis ces deux groupes de six bobines en série. Le primaire est alimenté sous la tension simple (les deux bobines en parallèle) et sous la tension composée du réseau (deux bobines en série).

1° **Le primaire est alimenté sous la tension simple du réseau.**

Le rapport de transformation m = 0,411.

TABLEAU 13

N° de la mesure	I_1 Ampères Courant primaire	I_2 Ampères Courant secondaire	V_1 Volts Tension primaire	V_2 Volts Tension secondaire	P_1 Watts Puissance	$Kc = \frac{P_1}{V_1 I_1}$	Kd : Facteur puissance d'après le diagramme	$I_1 d$ Ampères Courant primaire d'après le diagramme	C_μ Farads Capacité du secondaire
1	2,42	vide	131,5	320	90	0,274	0,335	2,42	vide
2	2,06	0,15	131	»	89	0,330	0,385	2,1	1,5
3	1,9	0,22	131	»	90	0,361	0,415	1,92	2,3
4	1,66	0,34	131,5	»	90	0,414	0,48	0,69	3,5
5	1,36	0,47	131	»	90	0,506	0,567	1,4	4,6
6	1,2	0,57	132	»	91,2	0,573	0,66	1,24	5,8
7	1	0,70	132,5	»	91,2	0,688	0,80	1,0	7
8	0,86	0,86	133	»	91,5	0,811	0,96	0,86	8,7
9	0,9	1,00	133	»	94	0,790	0,98	0,86	10
10	1,05	1,18	132	»	93	0,676	0,82	1,08	11,66
11	1,27	1,31	132,5	»	96	0,572	0,68	1,22	14,7
12	1,70	1,55	134	»	102	0,443	0,57	1,67	15
13	2,14	1,77	135	»	101	0,349	0,375	2,15	17,5
14	3,20	2,25	134	»	107,5	0,250	0,25	3,26	21

2° **Tension composée du réseau.**

Rapport de transformation m = 0,818.

TABLEAU 14

N° de la mesure	I_1 Ampères Courant primaire	I_2 Ampères Courant secondaire	V_1 Volts Tension primaire	V_2 Volts Tension secondaire	P_1 Watts Puissance	$Kc = \frac{P_1}{U_1 I_1}$	Kd : facteur de puissance d'après le diagramme	$I_1 d$ Amp. Courant primaire d'après le diagramme	C_μ Farads Capacité au secondaire
1	0,96	vide	229	280	55	0,25	0,33	0,96	vide
2	0,745	0,19	230	281,5	56	0,327	0,435	0,74	2,3
3	0,54	0,4	230	281,5	54,6	0,349	0,61	0,53	4,6
4	0,410	0,595	230	281,5	56	0,594	0,87	0,37	7
5	0,385	0,68	230	281,5	57	0,694	0,965	0,345	7
6	0,335	0,78	229	280	58,4	0,76	0,99	0,335	9,3
7	0,345	0,86	229	280	58	0,732	0,91	0,35	10
8	0,48	0,99	230	281,5	58	0,524	0,74	0,44	11,66
9	0,68	1,21	230	281,5	58,6	0,329	0,495	0,655	14
10	0,905	1,42	228	278,8	60,8	0,295	0,365	0,89	17,5

3° **Essais à tension variable.** — Nous alimentons le primaire du transformateur Gindre (deux bobines primaires en parallèles) par une tension variable. Pour chaque valeur de la tension nous cherchons le minimum du courant primaire. Pour ce minimum nous calculons le facteur de puissance. Nous étudions ainsi l'effet de la saturation sur la forme de la courbe de courant. Nous verrons en même temps avec quelle approximation la formule $I\mu = \sqrt{I^2_m + \left(\frac{I_2}{m}\right)^2}$ est vérifiée.

TABLEAU 15

N° de la mesure	$I\mu$ Ampères Courant primaire à vide	V_1 Volts Tension primaire	Im : Amp. Courant primaire minimum	I_2 : Amp. Courant secondaire correspondant à Im	$\frac{I_2}{m}$	$\sqrt{I^2_m + \left(\frac{I_2}{m}\right)^2}$	K
1	0,805	62	0,654	0,305	0,745	0,824	0,8
2	0,91	69,5	0,399	0,348	0,842	0,93	0,79
3	1,02	77	0,448	0,385	0,94	1,04	0,77
4	1,16	85	0,5	0,425	1,039	1,151	0,75
5	1,3	92,5	0,568	0,460	1,122	1,26	0,71
6	1,49	100,5	0,654	0,510	1,246	1,405	0,665
7	1,75	110	0,755	0,615	1,5	1,68	0,635
8	2	118,2	0,875	0,665	1,625	1,823	0,665
9	2,42	131,5	0,78	0,95	»	2,435	0,82

Pour le transformateur Gindre nous trouvons les mêmes résultats que dans le cas de celui de 25 kva.

Le tableau 15 nous montre que la formule :

$$\overline{I\mu}^2 = \overline{Im}^2 + \overline{\frac{I_2}{m}}^2$$

est vérifiée avec une approximation suffisante.

4° **Influence de la résistance sur le facteur de puissance.** — Nous avons fait l'essai suivant pour voir si une résistance en série avec le circuit primaire du transformateur a une

influence sur le facteur de puissance. Nous avons à cet effet utilisé un transformateur Gindre de puissance 2 KVA. Le primaire de ce transformateur est formé de deux bobines de 110 volts. Nous avons mis, dans une première série d'expériences, ces deux bobines en série. Le transformateur est alimenté par la tension composée du réseau. Dans une seconde série, les deux bobines primaires étant montées en parallèle, nous insérons une résistance variable dans le circuit primaire. Nous avons, pour chaque mesure, réglé la valeur de la résistance de telle sorte que l'on obtienne aux bornes du primaire une tension égale à la moitié de celle appliquée dans le premier cas. Nous avons de ce fait obtenu, dans les deux cas, la même induction.

1° Les deux bobines primaires en série.

TABLEAU 16. — *Rapport de transformation* m = 0.809

N° de la mesure	U_1 Volts Tension primaire	I_1 Ampères Courant primaire	P_1 Watts Puissance	I_2 Ampères Courant secondaire	U_2 Volts Tension secondaire	C_u Farads Capacité au secondaire	N° de la figure	$K = \frac{P_1}{U_1 I_1}$
1	229	0,97	61,26	vide	283	vide	1	0,278
2	230,5	0,7	63,6	0,125	»	2,3	»	0,354
3	231	0,653	63,5	0,33	»	3,5	2	0,422
4	231,5	0,57	64,5	0,42	»	4,6	3	0,489
5	231	0,413	65	0,592	»	7	4	0,68
6	231	0,33	65,5	0,79	»	9,3	»	0,86
7	232	0,34	66	0,837	»	9,8	5	0,838
8	232	0,635	68	1,25	»	14	6	0,447
9	232,5	1,00	70	1,55	»	18,5	»	0,3

2° Les deux bobines primaires en parallèle.

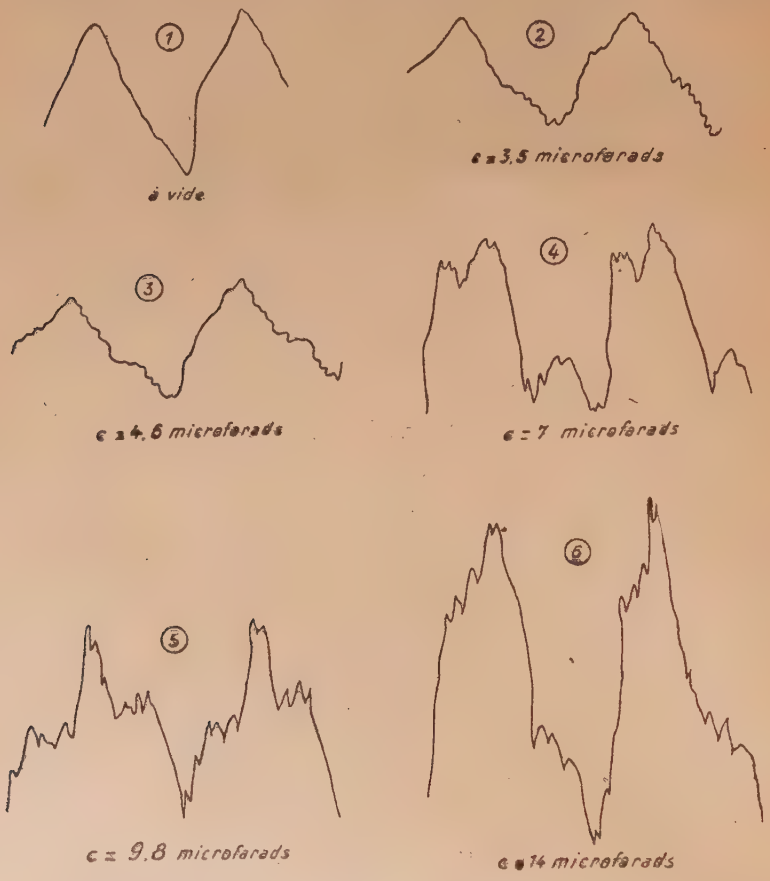
N° de la mesure	U_1 Volts Tension primaire	I_1 Ampères Courant primaire	P Watts Puissance	U_2 Volts Tension secondaire	I_2 Ampères Courant secondaire	C_μ Farads Capacité au secondaire	N° de la figure	$K = \frac{P_1}{U_1 I_1}$
1	115	2	58	140	vide	vide	7	0,252
2	»	1,62	58	»	0,12	1,5	»	0,313
3	»	1,52	60,4	»	0,12	2,3	8	0,347
4	»	1,43	61	»	0,275	2,8	»	0,371
5	»	1,36	63,5	»	0,34	3,5	»	0,407
6	»	1,15	64	»	0,44	4,6	9	0,487
7	»	0,82	64,8	»	0,61	7	»	0,487
8	»	0,59	66	»	0,9	10,5	10	0,975
9	»	0,69	67	»	1,00	11,6	»	0,845
10	»	1,06	67	»	1,18	14	11	0,55
11	»	1,0	67,8	»	1,48	17,5	»	0,294

Nous remarquons que le maximum du facteur de puissance dans le second cas est voisin de l'unité, tandis que dans le premier cas, ce maximum n'atteint que 0,85.

Lors du premier essai, les deux bobines primaires étant en série la courbe du courant primaire n'est pas altérée et le facteur de puissance a une valeur convenable. Cependant, au fur et à mesure que la valeur de la capacité insérée au secondaire augmente, la forme de la courbe du courant s'éloigne de plus en plus de la forme sinusoïdale, au contraire dans le second cas elle tend vers la sinusoïde.

Nous avons trouvé les mêmes résultats pour les transformateurs triphasés et transformateurs monophasés. Quand un transformateur fonctionne sur des capacités, ses pertes jusqu'au minimum du courant primaire sont pratiquement

les mêmes que celle du transformateur à vide. Le courant primaire diminue tout d'abord au fur et à mesure que la capacité au secondaire augmente. Pour une certaine valeur



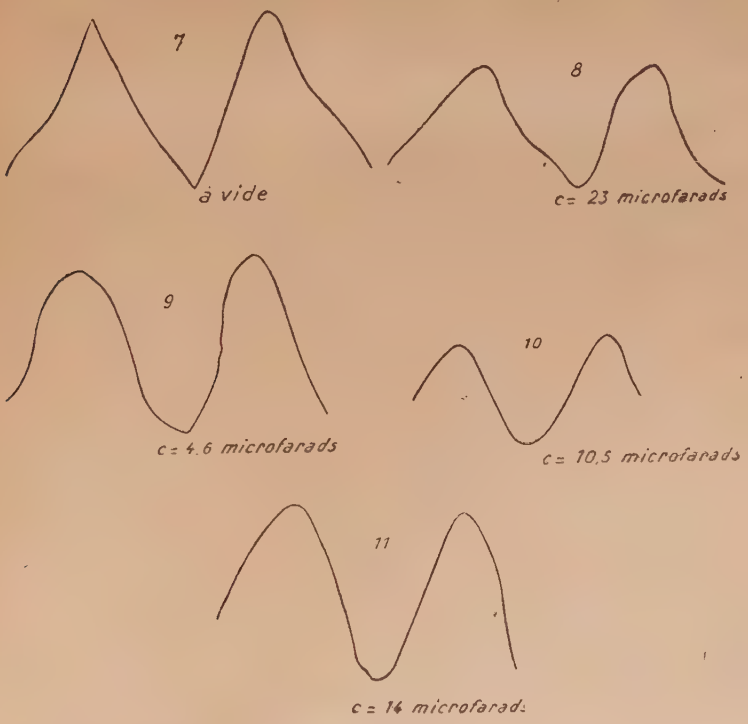
Transformateur Gindre 2 KVA monophasé. 2 bobines fournissant en série. Tableau 16, page 28.

Courbes de courant primaire relevées à l'oscillographe cathodique le primaire étant en série avec une résistance, le secondaire débitant sur des capacités variables.

de cette capacité nous avons un minimum de courant. Après ce minimum le courant augmente très vite avec la capacité.

Le facteur de puissance augmente avec la capacité et il

est maximum par le minimum de courant primaire. Ce maximum varie suivant la forme de la courbe de courant. Il est plus grand pour les transformateurs triphasés que dans le cas des transformateurs monophasés. En effet, dans le cas



Transformateur Gindre 2 K V A monophasé 2 bobines primaire en parallèle.

Courbes de courant primaire relevées à l'oscillographe cathodique le secondaire débitant sur des capacités variables, page

des transformateurs triphasés l'harmonique 3 et ses multiples n'intervenant pas, la courbe de courant est moins altérée et elle est plus près de la sinusoïde.

L'équation vectorielle : $\overrightarrow{I\mu} = \overrightarrow{I_1} + \overrightarrow{I_2/m}$ est vérifiée dans tous les cas envisagés, bien que les courants ne soient pas

sinusoïdaux. Ce diagramme des courants nous donne un moyen pour trouver le facteur de puissance qui est d'ailleurs différent du facteur de puissance calculé par la formule :

$$K = \frac{P}{U\ I}$$

En outre, ce diagramme est un moyen très facile pour la connaissance du courant primaire quand on connait le courant secondaire ou inversement. Pour cela il faut connaître simplement le point M.

Dans le cas des transformateurs triphasés nous avons un autre moyen ; nous avons employé la méthode des deux wattmètres pour évaluer la valeur de la puissance dissipée, nous connaissons donc P_1 et P_2. La connaissance de P_1 et P_2 nous permet de déterminer le facteur de puissance qui diffère du facteur de puissance calculé par la formule usuelle. Nous verrons par la suite la cause de cette discordance. En effet, dans la valeur du courant, la forme de la courbe de courant intervient, tandis que la tension étant sinusoïdale, la puissance n'est influencée que par le fondamental du courant. Le facteur de puissance déterminé par le rapport de P_1 et P_2 coïncide avec le cos. Φ (Φ étant le décalage entre la tension et le fondamental du courant).

Notre but était d'obtenir la vraie valeur des pertes d'un transformateur à vide. Nous avons vu que ces pertes sont les mêmes à vide et dans le cas où le transformateur fonctionne sur des capacités (à condition qu'on ne dépasse pas le minimum du courant primaire). Ce qui nous intéresse le plus c'est ce minimum. En effet, la tension et le fondamental du courant sont en phase (ce que nous verrons par la suite), le fondamental seul intervenant dans les pertes, le wattmètre n'a aucune influence sur le décalage.

Remarquons que dans le cas des triphasés (quand on emploie la méthode des deux wattmètres pour la mesure de la puissance) l'égalité de P_1 et P_2 nous indique la concordance des phases de la tension et du fondamental.

CHAPITRE III

Analyse de la courbe de courant et détermination du courant et de la puissance à partir de relevés oscillographiques

Nous avons constaté dans toutes nos expériences, que le facteur de puissance calculé d'après la formule habituelle:

$$K = \frac{P}{U\,I}$$

très faible à vide, passe par un maximum pour le minimum de courant primaire. Ce maximum dépend essentiellement de la forme de la courbe du courant et par suite de la saturation. Plus un transformateur est saturé plus la forme de la courbe du courant est altérée et plus le facteur de puissance s'éloigne de l'unité. La saturation décale les harmoniques par rapport au fondamental et influe sur leur amplitude.

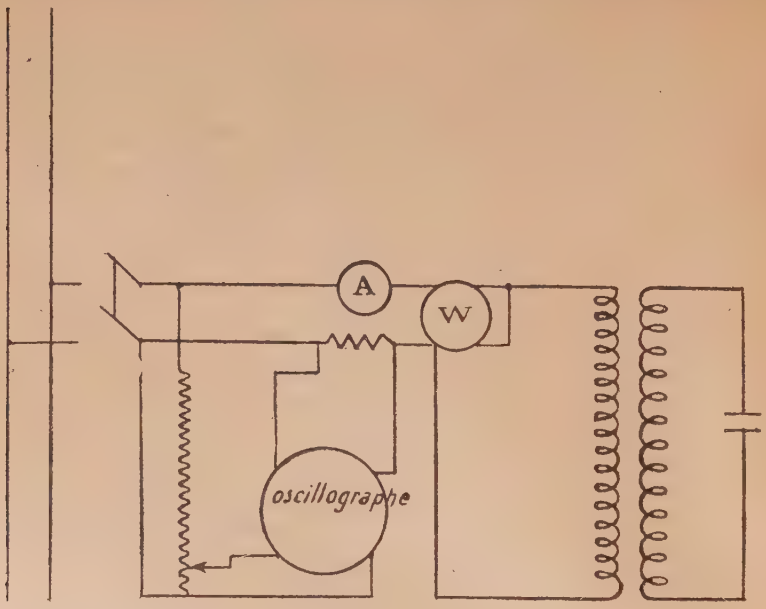
Les diverses remarques précédentes nous ont conduit à envisager une étude du phénomène en utilisant un oscillographe électromagnétique Blondel. Les clichés obtenus dans les conditions des expériences qui seront précisées par la suite, nous ont permis :

a) D'analyser la courbe de courant et de rechercher les amplitudes et les phases des divers harmoniques qui la composent;

b) De déterminer à partir de la courbe de courant i (t), la valeur efficace de ce dernier;

c) De calculer la puissance moyenne absorbée par le primaire d'un transformateur à partir du produit vi (t) des valeurs instantanées de la tension et du courant.

Le montage est le même que dans le cas d'un transformateur monophasé dont le secondaire débite sur des capacités; un des trois équipages de l'oscillographe Blondel est ali-



menté par un shunt. D'autre part un rhéostat de 5.000 ω en parallèle aux bornes du circuit primaire monté en potentiomètre, alimente le deuxième équipage de l'oscillographe.

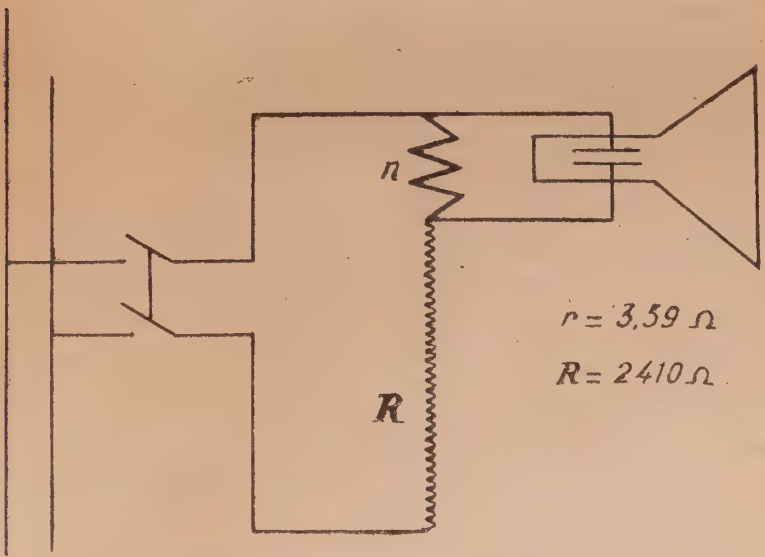
Au moment où nous photographions l'ensemble des courbes de courant et de tension, nous relevons les valeurs I_1 du courant primaire, P_1 de la puissance absorbée par le primaire, U_1 de la tension appliquée au primaire. Après chaque essai, nous étalonnons l'équipage de l'oscillographe qui nous donne la courbe du courant.

Analysons au préalable la courbe de la tension afin de vérifier si elle est sinusoïdale. Pour cela nous avons employé

une méthode très simple qui nous permet de connaître le rapport des amplitudes des divers harmoniques vis à vis de l'amplitude du fondamental, avec une approximation suffisante. Tout d'abord nous avons étalonné l'oscillographe. Nous avons utilisé le montage ci-dessous.

La tension entre phases U_1 = 230 volts, la résistance du shunt r = 3,5 ω, la résistance R = 2.410 ω.

1 cm. correspond à 0,164 volt.



Dans une deuxième expérience, sans toucher la résistance du shunt r, nous remplaçons le circuit résistant R par un circuit de résonance formé d'une capacité et d'une bobine de self variable.

En modifiant la valeur de la self ou en changeant la capacité, nous obtenons successivement la résonance des divers harmoniques. Nous mesurons les amplitudes en centimètres. Nous avons ainsi le nombre de volts correspondant aux différents harmoniques.

L'harmonique 5 a une amplitude de 3,8 cm., ce qui correspond à 0,624 volt.

L'harmonique 7 a une amplitude de 0,9 cm., ce qui correspond à 0,098 volt.

L'harmonique 11 a une amplitude de 1,1 cm., ce qui correspond à 0,147 volt.

Le rapport des amplitudes des différents harmoniques à l'amplitude du fondamental, est donc :

$$\frac{\text{Harmonique } 5}{\text{Fondamental}} = \frac{0{,}624}{230} \simeq 3/1000;$$

$$\frac{\text{Harmonique } 7}{\text{Fondamental}} = \frac{0{,}098}{230} \simeq 0{,}5/100;$$

$$\frac{\text{Harmonique } 11}{\text{Fondamental}} = \frac{0{,}147}{230} \simeq 1/1000$$

Il est par suite, légitime de considérer la tension comme sinusoïdale puisque l'amplitude d'aucun harmonique n'arrive à dépasser le centième de celle du fondamental.

La tension étant sinusoïdale nous avons pris sa valeur efficace.

Examinons tout d'abord les méthodes que nous avons employées. La courbe de courant étant une fonction périodique de période T peut être représentée par une fonction sinusoïdale de même période T et par un certain nombre de ses harmoniques. Nous pouvons écrire :

$$i = f(t) = A_1 \operatorname{Sin}\left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi_1\right) + A_2 \operatorname{Sin}\left(\frac{2\pi t}{T/2} + \varphi_2\right) + \ldots\ldots$$
$$+ A_n \operatorname{Sin}\left(\frac{2\pi t}{T/n} + \varphi_n\right) \ldots$$

Le premier terme fondamental ou harmonique 1 a pour période T, les autres de rang 2, 3... ont des périodes respectivement égales au quotient de T par le rang de l'harmonique.

Remplaçons $2\pi/T$ par la pulsation $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$, nous avons :

$$i = f(t) = A_1 \operatorname{Sin}(\omega t + \varphi_1) + A_2 \operatorname{Sin}(2\omega t + \varphi_2) + \ldots\ldots$$
$$\ldots\ldots + A_n \operatorname{sin}(n\omega t + \varphi_n) + \ldots\ldots$$

En développant il vient :

$$i = f(t) = a_1 \operatorname{Sin} \omega t + a_2 \operatorname{Sin} 2\omega t + \ldots + a_n \sin n\omega t + \ldots$$
$$+ b_1 \cos \omega t + b_2 \cos 2\omega t + \ldots + b_n \cos n\omega t + \ldots$$

le coefficient a_n s'obtient en multipliant les deux membres de l'égalité par Sin $n\omega t$ et en intégrant de O à T.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \operatorname{Sin} n\omega t \, dt$$

de même $$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t \, dt$$

Dans le cas qui nous concerne, il existe une particularité. Nous avons, en effet :

$$f(\omega t) = -f\left(\omega t + \frac{T}{2}\right)$$

C'est la courbe de courant qui nous montre cette identité prenons le terme général :

$$A_n \operatorname{Sin}(n\omega t + \varphi_n) = -A_n \operatorname{Sin}\left[n\omega\left(t + \frac{T}{2}\right) + \varphi_n\right]$$

$$A_n \operatorname{Sin}(n\omega t + \varphi_n) = -A_n \operatorname{Sin}[n\omega t + n\pi + \varphi_n]$$

Cette relation n'est valable que pour n impair, les termes pairs sont nuls. i (t) peut donc s'écrire :

$$i = f(t) = a_1 \operatorname{Sin} \omega t + a_3 \operatorname{Sin} 3\omega t + \ldots + a_{2n+1} \operatorname{Sin}(2n+1)\omega t + .$$
$$+ b_1 \cos \omega t + b_3 \cos 3\omega t + \ldots + b_{2n+1} \operatorname{Cos}(2n+1)\omega t + \ldots$$

a_{2n+1} est donné par l'intégrale $a_{2n+1} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \operatorname{Sin}(2n+1)\omega t \, dt$

Nous ne connaissons pas l'équation $i = f(t)$. Nous n'avons que la courbe expérimentale. Nous employons une méthode graphique. Nous construisons la courbe i(t) à une échelle convenable. i(t) étant égal à $-i\left(t + \frac{T}{2}\right)$ nous ne prenons que la moitié de la période, nous la partageons en vingt parties égales. La période entière correspondant à 2π, la demi-période correspond à π. Chaque partie vaut donc $\pi/20$, c'est-à-dire 9°. Pour chacune des divisions correspondantes, nous

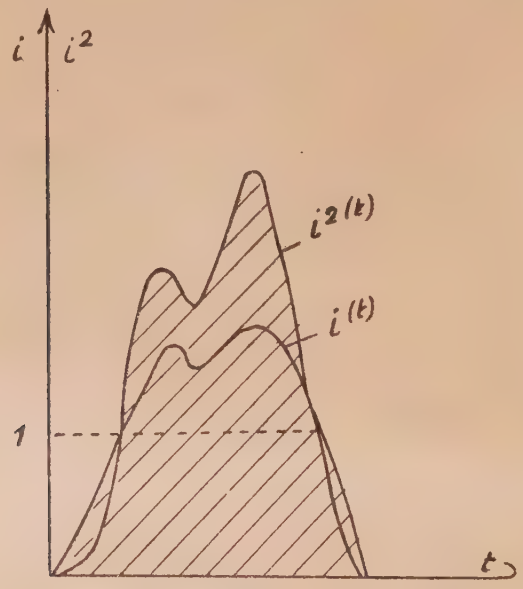
avons la valeur de l'ordonnée. Nous mesurons ainsi $y_1 = f(9°)$, $y_2 = f(18°)$... $y_{10} = f(180°)$ sur la courbe i(t). a_{2n+1} et b_{2n+1} sont alors donnés par les expressions suivantes.

$$a_{2n+1} = \frac{2}{20}\left[y_1 \text{ Sin } 9(2n+1) + y_2 \text{ Sin } 18(2n+1) + \ldots + y_{20} \text{ Sin } 180(2n+1)\right]$$

$$b_{2n+1} = \frac{2}{20}\left[y_1 \cos 9(2n+1) + y_2 \cos 18(2n+1) + \ldots + y_{20} \cos 180(2n+1)\right]$$

a_1, a_3... b_1, b_3... étant connus, nous obtenons A_1, A_2, A_5... et φ_1, φ_3... par les formules suivantes :

$$A_{2n+1} = \sqrt{a_{2n+1}^{-2} + b_{2n+1}^{-2}} \quad \ldots \quad \text{tg } \varphi_{2n+1} = \frac{b_{2n+1}}{a_{2n+1}}$$



Pour déterminer les valeurs du courant et de la puissance nous construisons les deux courbes :

$y_1 = I_1^2(t)$ et $y_2 = vi(t)$, i (t) étant égal à $-i\left(t + \frac{T}{2}\right)$

Nous prenons la demi-période. La surface hachurée est égale à :

$$\int_0^{\frac{T}{2}} i_1^2 dt$$

Par définition, la valeur efficace du courant est donnée par :

$$I^2eff = \frac{1}{T} \int_0^T 1_1^2 dt$$

Dans notre cas, nous pourrons écrire :

$\frac{2}{T}$ aire de la surface hachurée $= I^2eff.$

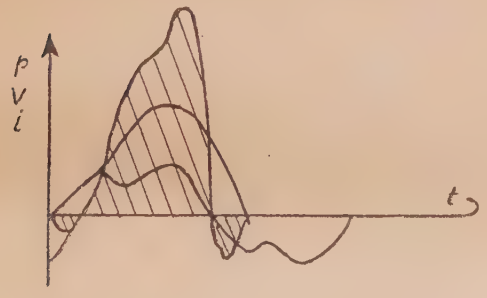
Un calcul simple va nous montrer qu'on peut obtenir Ieff à partir des coefficients a_1, a_2, a_3... b_1, b_2... En effet, écrivons:

$$I^2eff = \frac{1}{T} \int_0^T i_1^2 dt$$

Remplaçons i_1 par sa valeur et dveloppons :

$$I^2eff = \frac{1}{T} \int_0^T [a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega b + a_3 \sin \omega t + a_3 \cos 3\,\omega t + \ldots\ldots]^2 \, dt$$

$$I^2eff = \frac{1}{T} \int_0^T \Big[\Sigma\, a^2_{2k+1} \sin^2 (2k+1)\,\omega t + \Sigma\, b^2_{2k+1} \cos^2 (2k+1)\,\omega t$$
$$+ 2\,\Sigma\, a_{2j+1}\, h_{2k+1} \sin (2j+1)\,\omega t \cos (2k+1)\,\omega t$$
$$+ 2\,\Sigma\, a_{2j+1}\, a_{2k+1} \sin (2j+1\ \omega t \sin (2k+1)\,\omega t$$
$$+ 2\,\Sigma\, b_{2j+1}\, b_{2k+1} \cos (2j+1)\,\omega t \cos (2k+1)\,\omega t] \, dt$$



Les termes au carré nous donnent $a_1^2\ T/2$, $b_1^2\ T/2$...

Les termes en $\int_0^T \sin (2j+1)\,\omega t \cos (2k+1)\,\omega t \, dt.$

Les autres intégrales aussi. Nous avons une formule bien simple connaissant a_1, b_1... pour calculer I eff.

$$I\ eff = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\Sigma\, a_1^2 + \Sigma\, b_1^2} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\Sigma\, A_1^2}$$

Passons maintenant à la puissance.

L'aire hachurée sur la courbe y_2 (t) nous donne la puissance.

La puissance moyenne est égale à :

$$Pm = \frac{1}{T}\int_0^T vi\ dt = \frac{1}{T}\ \text{aire hachurée}$$

La puissance enregistrée par le wattmètre n'est que le produit de la valeur efficace de la tension par la valeur efficace du fondamental et par le Cos. Φ, Φ étant le décalage entre la tension et le fondamental du courant. En effet, $v = Vm \sin \omega t$ (on prend comme origine le zéro de latension

$i_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi'_1) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi'_3) + \ldots$

$$Pm = \frac{1}{T}\int_0^T Vm \sin \omega t\, [A_1 \sin(\omega t + \varphi'_1) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi'_3) + \ldots.]\, \alpha t$$

un développement simple nous montrerait que les termes en $\int_0^T \sin \omega t \sin 3\omega t\, dt$. sont nuls.

Il ne resterait alors que :

$$Pm = \frac{Vm\ A_1}{2}\cos \varphi'_1 = V_{eff}\ I_{feff} \cos(\widehat{V, I_f})$$

Nous allons donc calculer le courant et la puissance de deux manières différentes et nous comparerons ces valeurs avec celles mesurées par l'ampéremètre et le wattmètre. Nous comparerons en même temps les facteurs de puissance calculés et ceux donnés par le graphique. Nous verrons que le facteur de puissance calculé d'après P/VI n'a aucun sens et que la valeur du courant mesurée à l'ampéremètre n'est pas en général en accord avec la valeur réelle de ce courant.

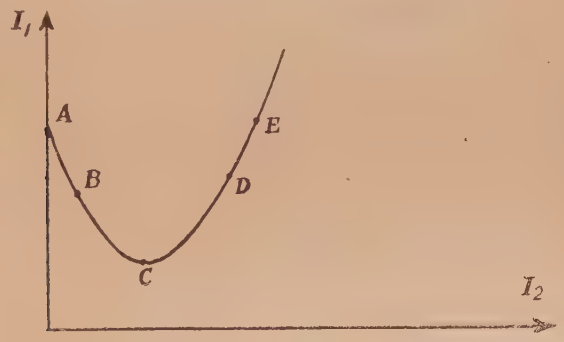
Cas du transformateur 25 KVA monophasé.

M. Haidar a étudié la courbe $I_1(I_2)$ du courant primaire en fonction du courant secondaire dans un transformateur dont

le secondaire débite sur des capacités. Il a trouvé que cette courbe a dans le cas d'une tension sinusoïdale, la forme de la courbe de Mordey. Nous avons pris sur cette courbe cinq points de fonctionnement, le point A correspond au fonctionnement à vide, le point B entre le fonctionnement à vide et le minimum, le point C au minimum. Les points D et E sont des points situés sur la branche montante.

1° *Fonctionnement à vide (point A).*

Nous prenons comme origine, l'origine du courant complexe. ψ_1, ψ_2... sont les décalages du fondamental et des harmoniques, par rapport au courant complexe.



Nous avons trouvé en employant la méthode indiquée :

$a_1 = 5{,}245$ Ampères. $\left.\begin{matrix}\\ \\ \end{matrix}\right\}$ $A_1 = 5{,}53$ Ampères.
$b_1 = 1{,}664$ Ampères.

$$\text{tg } \psi_1 = \frac{b_1}{a_1} = 0{,}316; \quad \psi_1 = 18°.$$

$a_3 = 0{,}098$; $b_3 = -2{,}04$; $A_3 = 2{,}04$ Ampères.
$\text{tg } \psi_3 = -20{,}95$; $\psi_3 = -87°20'$.
$a_5 = -0{,}455$; $b_5 = 0{,}470$; $A_5 = 0{,}654$ ampères.
$\text{tg } \psi_5 = -1{,}055$; $\psi_5 = 134°30'$.

L'équation approchée de courant résultant est donc :

$$y = 5{,}53 \text{ Sin } (\omega t + 18°) + 2{,}04 \text{ Sin } (3\ \omega t - 87°20') + 0{,}654 \text{ Sin } (5\ \omega t + 134°30').$$

Si on construisait cette courbe on verrait qu'elle est presque identique à celle donnée par l'oscillographe.

Le courant calculé d'après l'aire de la courbe $y_1 = i^2(t)$ est : Ic = 4,09 ampères.

Le courant calculé d'après la formule

$$I\ eff = \frac{I}{\sqrt{2}}\sqrt{\Sigma\ A_1\ 2}$$ est : I'c = 4,19 ampères.

Le courant mesuré : Im = 4,45 ampères.

Puissance calculée d'après l'aire de la courbe $y_1 = vi(t)$:

Pc = 267 watts.

Puissance calculée d'après la formule :

P'c = UIf cos Φ. Φ décalage entre U et le fondamental U = 218 volts. Pour calculer Φ : le diagramme nous donne le décalage de courant résultant par rapport à la tension et le calcul le décalage du fondamental vis à vis du courant résultant. La tension est en avance sur le courant complexe de 54°. Le fondamental est en retard sur le courant complexe de 18°. Φ = 54 + 18 = 72

$$I\ fondamental = \frac{A_1}{\sqrt{2}} = 3{,}90\ \text{ampères}$$

P'c = 218 × 3,90 cos 72° = 218 × 3,90 × 0,309 = 263 watts.

Puissance mesurée par le wattmètre :

Pm = 262 watts.

Les trois valeurs obtenues pour la puissance sont en bon accord. Par ailleurs, nous voyons que le seul facteur de puissance qui intervient dans le calcul de la puissance est le Cos. Φ. Φ étant le décalage du fondamental vis à vis de la tension.

2° *Au minimum du courant primaire (point C).*

a_1 = 1,73 ampères; b_1 = — 0,285 ampères;

A_1 = 1,753 ampères;

tg ψ_1 = — 0,165; ψ_1 = — 9°30′;

a_3 = 2,04 ampères; b_3 = 0,542 ampères; A_3 = 2,09 ampères;

tg ψ_3 = 0,266; ψ_3 = 15°.

Harmonique 5 :

$a_5 = 0{,}545$ ampères; $b_5 = -0{,}25$ ampères;

$A_5 = 0{,}60$ ampères;

$\text{tg } 4_5 = -0{,}460$; $4_5 = -25°$.

L'équation suivante :

$$y = 1{,}753 \sin (\omega t - 9°30') + 2{,}09 \sin (3\ \omega t + 15°) + 0{,}60 \sin (5\ \omega t - 25°)$$

représente la courbe de courant résultante d'une façon assez rigoureuse. La tension du réseau est de 220 volts.

Nous avons obtenu le minimum du courant primaire pour une capacité de C = 36,4 microfarads. Le wattmètre accusait une puissance Pm = 273 watts et l'ampéremètre un courant Im = 2,405 ampères.

L'intensité efficace calculée d'après la courbe de courant est égale à :

$$Ic = 1{,}91 \text{ ampère}$$

et celle calculée d'après :

$$I'c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum 2A_i^2}$$

$$I'c = 1{,}97 \text{ amp.}$$

La courbe $y_2 = vi\ (t)$ nous donne une puissance Pc = 275 watts et la puissance calculée d'après la formule :

$$P'c = UI_f \cos \Phi$$

est égale à : $P'c = 224 \times \frac{1.803}{\sqrt{2}} \cos \Phi$.

La tension est en avance de 12° sur la courbe de courant résultant et le fondamental de 9°30 :

$$\Phi = 12° - 9°30 = 2°30$$

$$\cos \Phi = 0{,}999$$

et $P'c = 224 \times 1{,}25 \times 0.999 = 275$ watts.

Au minimum du courant primaire la courbe de tension et le fondamental du courant sont en phase. L'écart constaté correspond à une erreur systématique. D'ailleurs, on ne peut obtenir le minimum de courant primaire avec une précision absolue, la variation de capacité au secondaire n'étant pas

continue. Si l'on tient compte des opérations successives exigées par la méthode, en particulier, reproduction à grande échelle des courbes par projection, étalonnage des équipages, étude graphique des courbes, etc..., et de l'erreur systématique inhérente à la méthode même d'analyse de la courbe de courant, l'écart constaté est négligeable.

3° *Au point B.*

Nous avons au secondeire une capacité de 14 microfarads.

$a_1 = 3{,}635$ ampères; $b_1 = 1{,}765$ ampères;

$A_1 = 4{,}04$ ampères;

$\operatorname{tg} \psi_1 = 0{,}485$; $\psi_1 = 26°$;

$a_3 = 1{,}31$ ampères; $b_3 = -1{,}81$ ampères;

$A_3 = 2{,}22$ ampères;

$\operatorname{tg} \psi_3 = -1{,}4$; $\psi_3 = -54°30$;

$a_5 = -0{,}197$ ampères; $b_5 = -0{,}18$ ampères;

$A_5 = 0{,}267$ ampères;

$\operatorname{tg} \psi_5 = 0{,}913$; $\psi_5 = -137°30$.

L'équation :

$$y = 4{,}04 \sin (\omega t + 26°) + 2{,}22 \sin (3\ \omega t - 54°) + 0{,}267 \sin (5\ \omega t - 137°30)$$

est l'équation approchée de la courbe de courant complexe.

Tension d'alimentation : U = 218 volts;

Puissance meurée : P = 262 watts;

Puissance calculée d'après le produit $P'_c = UI_f \cos \Phi$; la valeur efficace du fondamental est égale à $I_f = 2{,}86$ ampères, le décalage du fondamental vis à vis de la tension : nous connaissons le décalage du fondamental vis à vis du courant complexe; le décalage de tension par rapport au courant complexe est donné par le diagramme. Ce dernier est égal à 39°.

Le décalage : $\Phi = 26 + 39 = 65°$, et Cos. 65° = 0,422.

$P'c = 218 \times 286 \times 0{,}422 = 263$ watts.

Le courant mesuré est égal à Im = 3,27 amp.
Courant calculé d'après la courbe $y_1 = i_1^2(t)$.

$$Ic = 3{,}21 \text{ ampères.}$$

Courant calculé d'après $I'c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\Sigma A_1^2}$

$$I'c = 3{,}28 \text{ ampères.}$$

Nous constatons que le courant mesuré à l'ampéremètre et le courant calculé d'après la courbe ou la formule, sont identiques.

4° *Au point D.*

Capacité au secondaire = 52,5 microfarads.

$a_1 = 1{,}29$ ampères; $b_1 = -1{,}95$ ampères;

$$A_1 = 2{,}55 \text{ ampères;}$$

$\operatorname{tg} \psi_1 = -1{,}43$; $\psi_1 = -55°$; Ieff du fondamental = 1,665 A;

$a_3 = 1{,}56$ ampères; $b_3 = 1{,}69$ ampères;

$$A_3 = 3{,}07 \text{ ampères;}$$

$$\operatorname{tg} \psi_3 = 0{,}66; \quad \psi_3 = 33°;$$

$a_5 = 1{,}116$ ampères; $b_5 = 0{,}084$ ampères;

$$A_5 = 1{,}118 \text{ ampères;}$$

$$\operatorname{tg} \psi_5 = 0{,}008; \quad \psi_5 = 4°.$$

Tension d'alimentation : 238 volts;
Puissance mesurée : Pm = 312,5 watts;
Puissance calculée d'après le produit $UI\varphi \cos. \Phi$:

$$P'c = 238 \times 1{,}665 \operatorname{Cos.} \Phi.$$

Le décalage de tension par rapport au courant complexe :

$$\psi_1 = -16°; \quad \Phi = 55 - 16 = 39°.$$

Le fondamental est en avance sur la tension.

$$P'c = 238 \times 1{,}665 \times 0{,}777 = 308 \text{ watts.}$$

Courant mesuré : Im = 3,15 ampères.
Courant calculé : Ic = 2,81 ampères.

Courant calculé d'après $I'c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\Sigma A_1^2}$

$$= 2{,}845 \text{ ampères.}$$

5° *Au point E.* Capacité au secondaire: 70 microfarads.

$a_1 = 4{,}23$ ampères; $b_1 = 1{,}015$ ampères;

$A_1 = 4{,}33$ ampères;

$\text{tg}\ \psi_1 = 0{,}24$; $\psi_1 = 13°5$;

$a_3 = 2{,}008$ ampères; $b_3 = 1{,}234$ ampères;

$A_3 = 2{,}36$ ampères;

$\text{tg}\ \psi_3 = -0{,}61$; $\psi_3 = 31{,}30$;

$a_5 = -0{,}447$ ampères; $b_5 = 0{,}19$ ampères;

$A_5 = 0{,}485$ ampères;

$\text{tg}\ \psi_5 = -0{,}425$; $\psi_5 = +157°$.

Tension d'alimentation : 220 volts;
Puissance mesurée : Pi = 277,5 =atts;
Puissance calculée d'après la courbe $y_2 = vi\ (t)$:

Pc = 310,5 watts.

Puissance calculée d'après la formule $P'c = UI_1 \cos \Phi$.

L'angle ψ de décalage de la tension vis à vis du courant résultant est égal d'après le diagramme à :

$\psi = 79°30$; $\psi_1 = 13°30$; $\Phi = 79°30 - 13°30 = 66°$; le fondamental est en avance de 66° sur la tension. Cos. 66° = 0,404.

P'c est donc égale, la valeur efficace du fondamental étant égale = 3,07 ampères à :

$$P'c = 220 \times 3{,}07 \times 0{,}404 = 271{,}8 \text{ watts.}$$

Le décalage du courant sur la tension étant très grand, une petite erreur de 1° sur le décalage peut apporter une erreur appréciable sur la valeur de la puissance. Si nous calculons les Cos. 66° et de 67° nous voyons que la différence est de 0,404 — 0,388 = 0,016, une erreur de 4 %.

Courant mesuré Im = 4,04 ampères.
Courant calculé d'après la courbe $i^2(t)$:

ic = 3,55 ampères.

Courant calculé d'après la formule $I'c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\Sigma\ A_1^2}$

I'c = 3,52 ampères.

Résumé des Résultats.

TABLEAU 18

NUMÉRO DE LA MESURE	1	2	3	4	5	
Tension primaire en volts	218	220	218	238	220	
a_2 Ampères...	5,245	1,76	3,635	1,29	4,23	
b_1 » ...	1,664	0,285	11,76	1,95	1,01	
A_1 » ...	5,53	1,783	4,04	2,35	4,3	
a_e » ...	0,098	2,04	1,30	2,56	2,008	
b_2 » ...	— 2,04	0,502	— 1,81	1,69	— 1,234	
A_2 » ...	2,04	2,14	2,22	3,07	2,36	
a_s » ...	0,455	0,555	— 0,197	1,116	— 0,447	
b_e » ...	0,470	0,257	— 0,18	0,084	0,19	
As » ...	0,654	0,612	0,267	1,118	0,485	
P_1m Watts....	262	273	262	312,5	277,5	
P_1c »	267	275	»	302	»	
P'c »	263	275	263	316	271,8	
Im Ampères..	4,45	2,40	3,273	3,15	4,04	
Ic » ..	4,09	1,91	3,30	2,81	3,55	
I'c » ..	4,19	1,97	3,28	2,845	5,52	
C Microfarads	0	36,4	14	52,5	70	
Cos. $\Phi = \frac{P}{UI_f}$	0,302	0,992	0,420	0,778	0,411	
Cos Φ Graphique.	0,309	0,999	0,422	0,777	0,404	
Fact. de puissance P/UI_m	0,270	0,517	0,367	0,417	0,312	
— P/UI_c	0,293	0,65	0,374	0,485	0,355	

Nous voyons que le wattmètre est en accord avec la théorie. Le fondamental seul agit sur le wattmètre et le wattmètre enregistre la puissance vraie.

Si nous voulons connaître la valeur efficace du fondamental il faut photographier et analyser la courbe de courant mais pour le minimum de courant primaire le Cos. Φ du fondamental étant égal à l'unité la valeur efficace du fon-

damental est égale au quotient de la puissance mesurée par la valeur de la tension.

Une fois la valeur efficace du fondamental connue on peut avoir son Cos. Φ par la formule :

$$\text{Cos } \Phi = P/UI_f$$

La valeur du courant enregistrée par l'ampéremètre n'est pas en général conforme à la réalité.

Le facteur de puissance calculé d'après la formule km = Pm/UIm n'a pas de sens, Il se rapproche du facteur de puissance réel qui est : kc = Pm/UIc.

Transformateur 25 KVA attaqué du côté HT.

Minimum du courant primaire :

$a_1 = 1{,}122$ ampères; $b_1 = 0{,}203$ ampères;
$A_1 = 1{,}145$ ampères; $I_f = A\sqrt{2} = 0{,}81$ ampères;
$\text{tg } \psi_1 = 0{,}18$; $\psi_1 = 10°$;
$a_3 = 0{,}79$ ampères; $b_3 = 0{,}368$ ampères;
$A_3 = 0{,}92$ ampères; $\psi_3 = 25°$;
$\text{tg } \psi_3 = 0{,}467$; $b_5 = -0{,}073$ ampères;
$a_5 = 0{,}205$ ampères; $A_5 = 0{,}217$ ampères;
$\text{tg } \psi_5 = -0{,}356$; $\psi_5 = -19°30'$.

L'équation :

$$y = 1{,}45 \text{ Sin } (\omega t + 10°) + 0{,}92 \text{ Sin } (3\ \omega t + 25°) + 0{,}217 \text{ Sin } (5\ \omega t - 19°30').$$

représente la courbe de courant.

Courant calculé d'après $y_1 = i'(t)$ Ic = 1,11 amp.
Courant mesurée Im = 1,1 amp.
Courant calculé d'après $I'c = \sqrt{\Sigma Am^2/2}$ I'c = 1,035 amp.
Puissance mesurée 185 watts : $P = U_1 I_f$ = 182 watts.
Puissance calculée d'après $y_2 = vi(t)$ = 189 watts.

25 KVA à vide côté H. T.

$a_1 = 2{,}33$ ampères; $b_1 = 0{,}72$ ampères;
$A_1 = 2{,}58$ ampères; $I_{ff} = 1{,}82$ ampères;
$\text{tg } \psi_1 = 0{,}258$; $\psi_1 = 18°$.

Le décalage ψ entre la tension et le courant résultant = — 44°36.

$\Phi = 18 - (-44°38) = 62,48$ cos. $\Phi = 0,451$.

$U_1 = 226$ volts.

$P = U_1 I_1 \cos. \Phi = 185,5$ watts.

Puissance mesurée Pm = 187,5 watts.

Puissance calculée d'après $y_2 = vi(t) = 182$ watts.

$a_3 = 0,445$ ampères; $b_3 = -1,434$ ampères;

$A_3 = 1,5$ ampères;

$tg\ \psi_3 = -3,22$; $\psi_3 = -73°$;

$a_5 = -0,289$ ampères; $b_5 = -0,0245$ ampères;

$A_5 = 0,29$ ampères;

$tg\ \psi_5 = 0,08$; $\psi_5 = -175°$;

I mesuré Im = 2,032 ampères;

I calculé d'après $I'c = \sqrt{\Sigma An^2/2} = 2,033$ ampères.

I calculé d'après la courbe $y_1 = i^2(t)$ Ic = 1,90 ampères.

Le calcul montre et l'étude expérimentale vérifie que dans la valeur de la puissance, le fondamental du courant seul intervient. Les résultats oscillographiques nous confirment la méthode que nous avons suggéré pour la mesure des pertes à vide. En effet, nous avons vu que malgré que la courbe du courant ne soit pas sinusoïdale la valeur de la puissance calculée d'après les relevés oscillographiques coïncide avec celle donnée par le wattmètre. Quant au courant, les valeurs données par les ampéremètres employés différent, assez nettement des valeurs calculées par la formule habituelle, donnant le courant dans le cas où il y a des harmoniques.

Le facteur de puissance calculé d'après la formule $K = \frac{W}{VI}$ ne correspond ni au facteur de puissance réelle parce que la valeur de courant donnée par l'ampéremètre n'est pas la valeur exacte du courant ni au Cos. Φ, Φ étant le décalage du fondamental vis à vis de la tension.

Remarquons encore une fois qu'au minimum du courant primaire la tension et le fondamental du courant étant en phases nous pouvons avoir la vraie valeur de celui-ci.

Conclusions

Considérant les résultats exposés ci-dessus et relatifs au fonctionnement de transformateurs dont le secondaire débite sur des capacités, nous pouvons, dans les conditions de nos expériences, présenter les conclusions suivantes :

a) Nos essais ont confirmé que l'influence des décalages introduits par les transformateurs de mesure a une grande importance quand il s'agit de déterminer la puissance correspondant à un circuit comportant un décalage élevé entre le courant et la tension. La mesure des pertes à vide d'un transformateur de grande puissance rentre dans cette catégorie, et quand le facteur de puissance est très faible, voisin de 0,1, un décalage de 1° introduit par les transformateurs de mesure entraîne une erreur qui atteint de 10 à 20 %;

b) Quand le secondaire d'un transformateur débite sur des condensateurs, la forme de la courbe du courant primaire présente un aspect variable qui dépend de la valeur de la capacité utilisée. D'autre part, l'intensité de ce courant diminue, passe par un minimum, puis croît de nouveau lorsqu'on augmente progressivement la valeur de la capacité au secondaire;

c) La puissance mesurée directement au primaire, c'est-à-dire sans l'utilisation de transformateurs de mesure, reste pratiquement constante jusqu'au minimum du courant primaire. Ce résultat nous permet de proposer une méthode pour la mesure des pertes à vide dans un transformateur à haute tension : le secondaire de cet appareil alimentant une capacité de valeur telle que le courant primaire soit voisin du minimum, on mesure par la méthode habituelle la puis-

sance absorbée par le primaire; le facteur de puissance primaire étant alors à une valeur très voisine du maximum, les transformateurs de mesure ne peuvent par leur décalage propre entacher d'erreur appréciable la détermination de la puissance absorbée par le primaire;

d) La tension étant sinusoïdale, il n'en est pas de même du courant primaire. Le calcul montre et les relevés oscillographiques vérifient que la puissance est représentée par le produit UI cos. Φ de la valeur efficace de la tension, par la valeur efficace du fondamental du courant, par le cosinus du décalage de ce fondamental vis à vis de la tension. En particulier, pour la valeur minimum du courant primaire, le fondamental de ce dernier est en phase avec la tension, ce qui renforce la valeur de la méthode proposée ci-dessus pour la mesure des pertes à vide;

e) L'analyse des relevés oscillographiques a également confirmé que la valeur du courant indiqué par un ampèremètre électrodynamique diffère de son intensité réelle, lorsque la forme de ce courant cesse d'être sinusoïdale. Il en résulte des erreurs appréciables dans la détermination du facteur de puissance à partir de cos. $\Phi = P/VI$, en particulier lors de la marche à vide d'un transformateur et chaque fois que le courant n'est pas pratiquement sinusoïdal;

f) Bien que dans la plupart des fonctionnements réalisés le courant ne soit pas sinusoïdal, l'équation vectorielle $I\mu = I_1 + I_2/m$ où $I\mu$ désigne le courant primaire à vide, I_1 le courant primaire, I_2 le courant secondaire et m le rapport de transformation, est toujours vérifiée avec une grande approximation. En conséquence, il est possible de construire un diagramme des courants si on connaît simplement deux valeurs correspondants de I_1 et de I_2 et la valeur de m. A partir de ce diagramme on peut alors déterminer la valeur du courant à vide $I\mu$, la valeur minimum du courant primaire et par suite calculer la capacité permettant d'obtenir ce minimum.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

ETALONNAGE DES POSTES RÉCEPTEURS

VU ET APPROUVÉ :
Le Doyen
de la Faculté des Sciences
G. DUPOUY.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :
Toulouse, le 11 juillet 1947
Le Recteur
Président du Conseil
de l'Université
P. DOTTIN.